

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY

30-0041

Beeinflussung der Einleitungszone der  
Vorspannkkräfte in spannbettvorgespannten  
Balken durch erhöhte Temperaturen

Bericht erstattet von:

Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostásy

Dipl.-Ing. H. Sager

B I B L I O T H E K  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Braunschweig, September 1982

gefördert mit Hilfe von Forschungsmitteln des Landes Niedersachsen  
(Bewilligungserlaß des Nds. Ministers für Wissenschaft und Kunst  
vom 05.07.79 - 2091 - BV4e - 7/79)

INHALT	Seite
1. Problemstellung und Ziele der Forschungsarbeit	6
2. Stand der Forschung	6
3. Versuchsdurchführung	7
3.1 Allgemeines	7
3.2 Verfahren zur Bestimmung der Übertragungslänge	8
3.2.1 Untersuchungsverfahren bei Raumtemperatur	8
3.2.2 Bestimmung der Übertragungslängen	9
3.2.3 Untersuchungsverfahren bei hohen Temperaturen	10
3.2.4 Bestimmung der Veränderung der Übertragungslängen unter hohen Temperaturen	11
3.3 Versuchsprogramm	12
3.3.1 Baustoffe	12
3.3.2 Versuchskörper, Begleitkörper	13
3.3.3 Versuchsparameter der Hauptuntersuchung	14
3.3.4 Versuchsparameter der Nebenuntersuchungen	16
3.4 Herstellen der Versuchs- und Begleitkörper	16
3.4.1 Vorspannen der Spannstähle	16
3.4.2 Betonieren der Versuchskörper	17
3.4.3 Übertragen der Vorspannung	17
3.4.4 Lagerung der Versuchskörper bis zum Versuch	17
3.5 Versuchsaufbau bei hohen Temperaturen	18
3.5.1 Versuchsofen	18
3.5.2 Lagerung der Versuchskörper	19
3.5.3 Anordnung der Meßgeräte für die Untersuchung bei hohen Temperaturen	19
3.6 Meßverfahren	20
3.6.1 Meßverfahren bei Raumtemperatur	20
3.6.2 Meßverfahren unter hohen Temperaturen	20

4.	Versuchsergebnisse	23
4.1	Übertragungslängen nach dem Eintragen der Vorspannung	23
4.1.1	Übertragungslängen, ermittelt aus Betondehnungen	23
4.1.2	Übertragungslängen, ermittelt aus den Schlupfwerten der Spannstähle	25
4.1.3	Übertragungslängen, ermittelt aus Ausziehversuchen	30
4.1.4	Übertragungslängen, ermittelt aus dem Stahlspannungsverlauf mit DMS	32
4.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	32
4.2	Zeitabhängige Veränderungen bei Raumtemperatur	33
4.2.1	Schwindverformungen	33
4.2.2	Zeitabhängige Verformungen der vorgespannten Versuchskörper	33
4.2.3	Zeitabhängige Schlupfänderungen	33
4.2.4	Veränderung der Stahlspannungen ( $D_I/2$ , $D_{III}/2$ )	35
4.2.5	Veränderung der Übertragungslängen	35
5.	Ergebnisse der Hauptuntersuchung	38
5.1	Temperaturabhängige Veränderungen der materiellen Eigenschaften der Baustoffe	38
5.1.1	Veränderung der Stahleigenschaften	38
5.1.2	Veränderung der Betoneigenschaften	39
5.1.3	Verbunduntersuchungen	41
5.1.3.1	Verbundverhalten unter konstanten Temperaturen	41
5.1.3.2	Verbundkriechen	41
5.2	Versuchsergebnisse der Hauptuntersuchungen	42
5.2.1	Temperaturverteilung über den Querschnitt der Versuchskörper	42
5.2.2	Thermische Dehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie (ODM)	43
5.2.3	Thermische Gesamtdehnungen	43
5.2.4	Stabendverschiebungen	44
5.2.5	Stahldehnungen (DMS)	44
5.3	Vorzeitiges Versagen der Versuchskörper	44
5.4	Versuchskörper nach dem Versuch	45

	Seite
6. Beurteilung der Versuchsergebnisse unter hohen Temperaturen	46
6.1 Verhalten der spanndrahtvorgespannten Versuchskörper	46
6.2 Verhalten der mit Litzen vorgespannten Versuchskörper	51
6.3 Zusammenfassung	53
7. Literaturverzeichnis	55
Anhang	57



Symbole:

$A_z$	Fläche des Spannstahls	
$E_z$	E-Modul des Spannstahls	
$d_v$	nomineller Spannstahldurchmesser	
$d_z$	Vergleichsdurchmesser	
$\beta_s, \sigma_{0,2}$	Streckgrenze gemäß Zulassung	
$\beta_z$	Zugfestigkeit gemäß Zulassung	
$R_{p0,01}$	Elastizitätsgrenze	} durch Versuch ermittelt
$R_{p0,2}$	Streckgrenze	
$R_{pm}$	Zugfestigkeit	
$\sigma_x$	Stahlspannung an der Stelle x	
$\sigma_z^0$	Stahlspannung im Spannbett	
$\sigma_z$	Stahlspannung nach dem Übertragen	
$P$	Übertragene Vorspannkraft	
$\Delta\sigma_z$	Stahlspannungsverlust	
$\epsilon_z$	Stahldehnung	
$\Delta\epsilon_z$	Stahldehnungszunahme	
$\epsilon_r$	Kriechdehnung des Stahls	
$k_1$	Verbundbeiwert	
$f_R$	bezogene Rippenfläche	
$A_R$	Rippenfläche	
$r_1$	Radius des Einzeldrahtes Litze	
$\ell_v$	Verwindungslänge	
$\delta_z$	Schlupf des Stahls	
$\dots_m$	mittlere Werte	
$\dots(\vartheta)$	temperaturabhängige Werte	
$\text{crit } T$	kritische Stahltemperatur gem. DIN 4102	

$A_b$	Betonfläche
$E_b$	E-Modul Beton
$\beta_{w4}$	Würfeldruckfestigkeit nach 4 Tagen
$\sigma_b$	zulässige Betondruckspannung (DIN)
$\sigma_b$	vorhandene Druckspannung
$\epsilon_b$	lastabhängige Dehnung des Betons
$\epsilon_k$	Betonkriechdehnung
$\epsilon_s$	Betonschwinddehnung
$\epsilon_{ges}$	Gesamtdehnung aus Temperatur, Kriechen und Schwinden
$\epsilon$	thermische Dehnung des Betons
$\epsilon_{Ik}$	instationäre Dehnung des Betons
$e$	Eintragungslänge
$l_{\bar{u}}$	Übertragungslänge
$c$	Betondeckung
$v$	Stabendverschiebung
$\Delta v$	Differenz von Stabendverschiebungen
$x$	laufende Koordinate
$t$	Zeit
$\vartheta$	Temperatur
$\dot{\vartheta}$	Aufheizgeschwindigkeit
$n$	Verhältnis der E-Moduli
$\mu$	Verhältnis der Stahlfläche zur Betonfläche
$\dots_m$	mittlere Werte
$\dots(\vartheta)$	temperaturabhängige Werte
$F$	Feuerwiderstandsdauer
ETK	Einheitstemperaturzeitkurve
$\varphi$	Kriechfunktion
$c_1$ $\gamma_1$	Koeffizienten der Kriechfunktion
$\vartheta_{Ra}$	
$\vartheta_{Ra}$	Raumtemperatur

## 1. PROBLEMSTELLUNG UND ZIELE DER FORSCHUNGSARBEIT

Bei der Vorspannung im Spannbett werden die Drähte im Beton durch Verbund verankert. Die Übertragung der Vorspannkraft vom Stahl auf den Beton wird innerhalb der Eintragungslänge durch Reibung, Haftung und Scherwiderstand zwischen Stahl und Beton erreicht und ist von der Qualität des Verbundes abhängig. Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, durch Versuche festzustellen, ob und in welchem Maße die Eintragungslänge von spannbettvorgespannten Balken durch Temperaturbeanspruchung beeinflußt wird und somit zu einem Absinken der Vorspannung und zum Versagen des Bauteils führen kann.

## 2. STAND DER FORSCHUNG

Aus der Literatur sind keine Untersuchungen bekannt, die sich mit dem grundsätzlichen Verhalten der Eintragungslänge unter Temperaturbeanspruchung befassen.

Über die Untersuchung an Spannbetonbauteilen bzw. an spannbettvorgespannten Balken wird in [2.1, 2.2, 2.3] berichtet. Doch in allen diesen Darstellungen waren die Versuchskörper zusätzlich zur Vorspannung auf Biegung belastet und die Aufheizgeschwindigkeit entsprach der Einheitstemperaturzeitkurve (ETK).

### 3. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

#### 3.1 Allgemeines

Grundlage zur Herstellung der Versuchskörper und zur Versuchsdurchführung waren die Richtlinien für die Prüfung von Spannstählen auf die Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund [3.1] sowie DIN 4227, Teil 1 [3.2]. Die Richtlinien enthalten Bestimmungen zur Durchführung von Eignungsprüfungen bei Raumtemperatur. Für die Ermittlung der Übertragungslängen bei erhöhten Temperaturen liegen keine Erfahrungen vor.

DIN 4102, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Teil 4 [3.3] enthält jedoch Angaben über die Mindestabmessung von Bauteilen sowie über die kritischen Temperaturen  $T_{crit}$  von Spannstählen für den Brandfall, die in Tab. 1 zusammengestellt sind. Mit DIN 4102 können Bauteile jedoch nur nach ihrer Feuerwiderstandsdauer, geprüft unter der Temperaturbeanspruchung der Einheitstemperaturzeitkurve ETK:  $\vartheta - \vartheta_0 = 345 \log (8 \cdot t + 1)$  beurteilt werden.

Für die Untersuchung der Einleitungszone ist diese Temperaturzeitbeanspruchung ungeeignet. Um Richtwerte zur Festlegung der Querschnittsabmessungen und der Betondeckungen zu erhalten, wurde die Feuerwiderstandsklasse F 30 zugrundegelegt; dies entspricht einer Brandraumtemperatur von rd 850°C.

Tab. 1: Wesentliche Daten der Versuchskörper  
nach |3.1|3.2|3.3|

<u>Beton:</u>	B 45	-
Sieblinie (Quarzkies)	B 16	-
Zementgehalt (PZ 45 F)	400	kg
Mehlkorngehalt	450	kg
$\beta_{w4} = \beta_{w\text{Übertragung}}$	40	N/mm <sup>2</sup>
zul $\sigma_b$ DIN 4227 (4102)	15 (13,5)	N/mm <sup>2</sup>

<u>Spannstahl:</u>	Litze	Draht	
0.8 $\beta_s$	1256	1176	N/mm <sup>2</sup>
0.75 $\beta_s$	1177,5	1102,5	N/mm <sup>2</sup>
$k_1$	65	65	-
crit T	350	375	°C

<u>Versuchskörper:</u>			
Länge $2l_{\ddot{u}} + 100$	262,5	197,5	cm
Betondeckung C (DIN 4227)	18,75	11,25	mm
Betondeckung C (DIN 4102)	20,75	23,75	mm
Mindestbreite b	120	120	mm

### 3.2 Verfahren zur Bestimmung der Übertragungslängen

#### 3.2.1 Untersuchungsverfahren bei Raumtemperatur

Die Übertragungslängen wurden nach den Prüfrichtlinien |3.1| durch den Spannkrafteinleitungsversuch ermittelt. Die Vorspannkraft wurde gleichzeitig und stetig in drei Stufen in den Prüfkörper eingeleitet. Die Betondehnungen wurden an den Seitenmittellinien ermittelt.

Die zeitabhängigen Verformungen ergaben sich aus den Messungen sofort nach dem Übertragen der Vorspannung sowie nach 1,2,4,7,28,56,84 und rd 260 Tagen. Die Schwindverformungen wurden zur gleichen Zeit an den nicht vorgespannten Versuchskörpern (D IO, D III O, LO) ermittelt.

Durch den Einsatz von Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen konnte bei zwei mit profiliertem Spanndraht  $\varnothing 7,5\text{ mm}$  vorgespannten Versuchskörpern (D I,2, D III,2) der Verlauf der Spannstahlspannungen vom Übertragen an bis zu 2500 Minuten (D I,2) bzw. rd 10 000 Minuten (D III,2) an drei Stellen bestimmt werden.

Außerdem wurde der Schlupf der Spannstähle je Versuchskörper an einem oberen und an dem gegenüberliegenden Ende an einem unteren Spannstahl ermittelt.

Zusätzlich zum Übertragungsversuch wurde anhand von Ausziehversuchen die Last-Stabendverschiebungs-Beziehung (Grundgesetze) der beiden Spannstahlarten ermittelt.

### 3.2.2 Bestimmung der Übertragungslängen

Entsprechend [3.1] wurde die Übertragungslänge aus den Betondehnungen unmittelbar nach dem Eintragen der Vorspannung ermittelt. Die Übertragungslänge  $l_{\ddot{u}}$  ergab sich aus der Eintragungslänge  $e$ , die vom Versuchskörperende bis zu dem Querschnitt gemessen wurde, an dem 80 % der mittleren Höchstwerte der Längsdehnung erreicht wurden. Die Übertragungslänge  $l_{\ddot{u}}$  ergab sich daraus zu  $l_{\ddot{u}} = 1.35 \cdot e$ . Aus dem ermittelten Schlupf der Spannstähle unmittelbar nach dem Eintragen der Vorspannung wurde gemäß [3.4, 3.5] die Übertragungslänge rechnerisch bestimmt. Zusätzlich wurden die Übertragungslängen aus den mittleren Last-Verschiebungskurven der Ausziehversuche rechnerisch ermittelt. Bei den mit DMS versehenen D-Körpern konnte von dem Stahlspannungsverlauf auf die Einleitungslänge geschlossen werden.

### 3.2.3 Untersuchungsverfahren bei hohen Temperaturen

Für die Bestimmung der Übertragungslänge spannbettvorge-spannter Balken bei hohen Temperaturen sind aus der Literatur keine Meßverfahren bekannt. Um unmittelbar Aussagen über den Spannungsverlust der Spannstähle zu erhalten, wurden Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen eingesetzt. Der Einsatz dieser HT-DMS ist nur auf relativ glatten Oberflächen möglich. Die Untersuchung mußte somit auf die mit Draht vorgespannten Versuchskörper begrenzt bleiben.

Die Stabendverschiebung der Spannstähle wurde mit einem Röhrenquarzglasdilatometer (s. Kap. 3.6) bestimmt. Dieses Gerät ermöglicht die horizontale Messung von Relativverschiebung zwischen Stahl und Beton unter hohen Temperaturen. Zur Messung der Betondehnungsverteilung über die Versuchskörperlänge wurde ein 'optisches Dehnmeßgerät' (ODM) eingesetzt (s. Kap. 3.6). Die Gesamtdehnung des Versuchskörpers wurde je Versuchskörperseite mit einem Quarzglasdilatometer (s. Kap. 3.6) bestimmt.

Die nicht vorgespannten Versuchskörper (D I O, D II O, L O) dienten der Ermittlung der rein thermisch bedingten Veränderungen von Schlupf und Dehnungen. Durch die Berücksichtigung der Veränderungen der O-Körper konnte bei den vorgespannten Versuchskörpern auf die spannungsbedingte und temperaturabhängige Veränderung geschlossen werden. Zusätzlich wurden die temperaturabhängigen Materialkennwerte des Stahles und des Betons bestimmt. Durch begleitende Ausziehversuche unter hohen Temperaturen wurde die Last-Stabendverschiebungs-Beziehung exzentrisch einbetonierter Stähle ermittelt. Die Untersuchungen wurden ergänzt durch Ausziehversuche an zentrisch einbetonierten Stäben.

#### 3.2.4 Bestimmung der Veränderung der Eintragungslängen unter hohen Temperaturen

Die Eintragungslängen ließen sich nicht wie bei Raumtemperatur direkt aus den Dehnungen der Meßstrecken auf der Seitenmittellinie bestimmen. Aussagen über die Veränderung der Eintragungslänge konnten nur aus den Vergleichen von Schlupf und Dehnungen der Versuchskörper mit den freien Dehnungen der verwendeten Baustoffe gewonnen werden.

Anhand der Messungen der HT-DMS konnten diese Aussagen bestätigt und die Veränderung der Eintragungslänge bis rd 500 °C bestimmt werden.

Die optische Dehnungsmessung konnte nur als grobe Hilfe dienen, da über 500°C - 550°C keine Messungen mehr möglich waren. In diesem Temperaturbereich traten jedoch die hauptsächlichen Veränderungen auf.



### 3.3 Versuchsprogramm

#### 3.3.1 Baustoffe

Für die Spannbewehrung der Versuchkörper wurden zwei Sorten von Spannstahl gewählt: kaltgezogener, profilierter Spanndraht, 1470/1670,  $\emptyset$  7,5 mm und 7-drähtige Litze, 1570/1770,  $\emptyset$  12,5 mm (93 mm<sup>2</sup>).

Die mechanischen Kennwerte der Spannstähle sind Tab. 2 zu entnehmen.

Tab. 2: Mechanische Kennwerte der Spannstähle

Stahl-sorte	$d_v$ [mm]	<sup>1)</sup> $d_z$ [mm]	$A_z$ [mm <sup>2</sup> ]	$R_p$ 0.01 [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_p$ 0.2 [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	E [kN/mm <sup>2</sup> ]	$f_R$ [ - ]
Draht	7,5	7,5	43,24	-	1505	1777	208,4	0,0085
Litze	12,5	10,86	92,86	1390	1820	1920	201,0	0,0030 <sup>2)</sup>

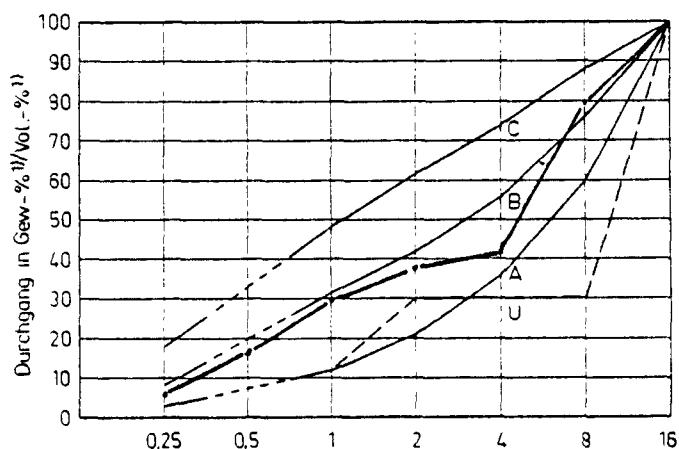
1) Für die Litze ergibt sich der Vergleichsdurchmesser zu  $d_z = \sqrt{\frac{A_z \cdot 4}{\pi}}$

2) Die bezogene Rippenfläche der Litzen wurde nach BIRKENMAIER [3.9] berechnet zu  $f_R = \frac{A_R}{\pi \cdot d \cdot l_v}$  mit  $A_R = r_1^2 (5\pi - 6\sqrt{3})$ ;  
 $d = d_v$ ,  $l_v$  = Verwindungslänge

Tabelle 3 enthält die Betonzusammensetzung und die Sieb-linie. Angestrebt wurde eine Sollwürfeldruckfestigkeit beim Übertragen der Vorspannung nach rd vier Tagen von  $\beta_{w4} = 40 \text{ N/mm}^2$ .

Tab. 3: Betonzusammensetzung und Sieblinie

Mischungsanteile B 45	kg/m <sup>3</sup>
Zement PZ 45 F	340
Wasser	170
Zuschlag (B 16)	1834
Mehlkorngehalt	450



Als Zuschläge wurden natürlich vorkommende, überwiegend runde quarzitisches Grubensande und Kiese des Harzvorlandes verwendet. Die Sieblinie wurde aus den Fraktionen 0/1, 0/2, 2/8, 8/16 zusammengesetzt. Der Wasserzementwert betrug  $w = 0.50$ . Das Ausbreitmaß betrug i.M. 33,5 cm, das Verdichtungsmaß nach Walz 1.20.

### 3.3.2 Versuchskörper, Begleitkörper

Die Versuche wurden an rechteckigen Spannbetonbalken durchgeführt, die mit 4 Spannstählen in den Ecken bewehrt waren. Die Abmessungen der Versuchskörper sind Tab. 4 zu entnehmen (s. Bild 3.1). Zusätzlich zu den Versuchskörpern wurden je Herstelltermin neun Würfel (0,15 x 0,15 x 0,15), sechs Zylinder (0,15 x 0,30) und ein Schwindkörper sowie 12 Ausziehversuchskörper hergestellt. Der Schwindkörper hatte die Querschnittsabmessung der Versuchskörper und war 600 mm lang. Die Ausziehversuchskörper (0,20 x 0,20 x 0,25 Litze; 0,15 x 0,15 x 0,15 Draht) wurden liegend hergestellt. Die Betondeckung der unten liegenden Stähle entsprach der der Versuchskörper; der Abstand der Verbundstrecke von der Grundfläche betrug  $10 d_v$ , die Länge der Verbundstrecke  $5 d_v$  (s. Bild 3.2).

### 3.3.3 Versuchsparameter der Hauptuntersuchung

Die Versuchsparameter sind Tabelle 4 zu entnehmen. Die Abmessungen der Versuchskörper sowie die Lage der Bewehrung war je Spannstahlart gleich, es wurde jedoch jeweils eine Gruppe von Körpern mit einer Stahlspannung im Spannbett  $\sigma_z^0 = 0.6 \beta_s$  (DI,LI), die andere mit  $\sigma_z^0 = 0.8 \beta_s$  (DII,LII) vorgespannt. Zusätzlich wurde ein Versuchskörper je Spannstahlart mit gleichen Abmessungen, jedoch ohne Vorspannung aber mit schlaff eingebautem Spannstahl hergestellt (DO,LO). Bei der Übertragung der Vorspannkraft der mit Draht und mit einer Spannstahlspannung von  $0.8 \beta_s$  vorgespannten Versuchskörper entstanden Risse in der Betondeckung. Diese Versuchskörper wurden unbrauchbar (DII 1,2,3). Die neu hergestellten Körper DIII 0,1,2,3 mußten mit einer vergrößerten Betondeckung  $c$  ausgestattet werden. Der Querschnitt von DIII wurde so gewählt, daß sich nach dem Übertragen der Vorspannung nahezu gleiche Betondruckspannungen ergaben wie bei DI. Zusätzlich zu dem nicht vorgespannten Versuchskörper DI,0 wurde ein weiterer Vergleichskörper DIII,0 erforderlich. Außerdem wurden neben Spannstahlart und Höhe der Vorspannung die max. Temperatur variiert sowie in einem Fall die Aufheizgeschwindigkeit.

Tab. 4: Versuchsparameter der Versuchskörper

Gruppe	Träger Bez.	Beton			Stahl		$\sigma_z^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungen		Versuch	
		Abmessungen [cmxcmxcm]	$\beta_{w4}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	c [mm]	Güte [N/mm <sup>2</sup> ]	$d_v$		$\sigma_z$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_b$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Temperatur [°C]	Bemerkungen
O	Lo	14,0x21,0x325	41,8	31,25	1570/1770	12,5	0	0	0	650	
	DI,0	10,5x12,5x205	41,8	18,75	1470/1670	7,5	0	0	0	800	
	DIII,0	12,3x14,3x205	44,7	27,75	1470/1670	7,5	0	0	0	800	
LI	LI,1	14,0x21,0x325	41,8	31,25	1570/1770	12,5	$0,6\beta_s \hat{=}$			850	
	LI,2	14,0x21,0x325	41,8	31,25	1570/1770	12,5	942	833,0	10,6	550	
LII	LII,1'	14,0x21,0x325	49,4	31,25	1570/1770	12,5	$0,8\beta_s \hat{=}$			$\sim 320^*$	
	LII,2	14,0x21,0x325	49,4	31,25	1570/1770	12,5	1256	1119,0	14,2	$\sim 320^*$	
DI	DI,1	10,5x12,5x205	47,5	18,75	1470/1670	7,5	$0,6\beta_s \hat{=}$			800	
	DI,2	10,5x12,5x205	47,5	18,75	1470/1670	7,5	882	772,0	10,2	500	HT-DMS
	DI,3	10,5x12,5x205	47,5	18,75	1470/1670	7,5	882			550	
DII	DII,1	10,5x12,5x205	43,7	18,75	1470/1670	7,5	$0,8\beta_s \hat{=}$			-	Betondeckung
	DII,2	10,5x12,5x205	43,7	18,75	1470/1670	7,5	1176	1066,0	14,0	-	
	DII,3	10,5x12,5x205	43,7	18,75	1470/1670	7,5	1176			-	gerissen
DIII	DIII,1	12,3x14,3x205	44,7	27,75	1470/1670	7,5	$0,8\beta_s$			800	
	DIII,2	12,3x14,3x205	44,7	27,75	1470/1670	7,5	1176	1066,0	10,5	500	HT-DMS
	DIII,3	12,3x14,3x205	44,7	27,75	1470/1670	7,5	1176			$\sim 340^*$	2,5 °C/Min

\* Versuchskörper versagten schlagartig bei der angegebenen Temperatur

### 3.3.4 Versuchsparameter der Nebenuntersuchungen

Zur Ermittlung der temperaturabhängigen Last-Verschiebungs-Beziehungen der Stahlarten wurden Ausziehversuche an exzentrischen Körpern bei Raumtemperatur sowie 200 °C, 400 °C und 600 °C durchgeführt. Diese Ergebnisse wurden ergänzt durch Ausziehversuche an zentrisch einbetonierten Spanndrähten und Litzen.

Zur Ermittlung der temperaturabhängigen Veränderungen der mechanischen Kennwerte der Baustoffe allein, wurden die Untersuchungsergebnisse des Sonderforschungsbereichs 148 'Brandverhalten von Bauteilen' genutzt. Dem Arbeitsbericht 1978-1980 [3.7] wurden die Kennwerte für Spannstahl entnommen. Die untersuchten Lastniveaus der Warmkriechversuche an Litzen entsprachen den Spannungen der Litzen in den Versuchskörpern vor dem Eintragen der Vorspannung und vor den Versuchen.

## 3.4 Herstellen der Versuchs- und Begleitkörper

### 3.4.1 Vorspannen der Spannstähle

Das für die Herstellung der Versuchskörper zur Verfügung stehende Spannbett ermöglichte das Vorspannen in zwei Schritten. Zuerst wurden die vier Drähte gemeinsam mit zwei Pressen vorgespannt. Der Öldruck der Pressen und ihr Weg wurden kontrolliert. Durch die Verwendung von Ringkraftmeßdosen C 6 (50 t) der Firma Hottinger (GK 0,5) und durch die Verwendung von Gewindeblöcken sowie Keilverankerung der Spannstähle in Kupplungen konnte dann jeder Spannstahl einzeln ohne Keilschlupf auf den gewünschten Wert vorgespannt werden. Damit ergaben sich max. Spannungsunterschiede je Versuchsbalken von 1 % (s. Bild 3.3 und 3.4). Bei den drahtbewehrten Versuchskörpern konnte die Vorspannung bzw. die zugehörige Dehnung über DMS kontrolliert werden.

#### 3.4.2 Betonieren der Versuchskörper

Zum Betonieren stand ein 300-l-Zwangsmischer zur Verfügung. Der Beton wurde lagenweise eingebracht und mit einer Rüttelflasche  $\varnothing$  36 mm verdichtet, wobei besonders darauf geachtet wurde, die Spanndrähte nicht zu berühren. Vom darauf folgenden Tag an bis zum Übertragen der Vorspannung wurden die Versuchsbalken mit Tüchern feuchtgehalten und mit Folie abgedeckt. Die für die Erhärtungsprüfung vorgesehenen Prüfwürfel sowie der Schwindkörper und die Ausziehkörper wurden neben den Versuchskörpern unter gleichen Bedingungen gelagert. Die für den Nachweis der Güteprüfung erforderlichen Begleitkörper wurden gemäß DIN 1048 hergestellt und gelagert.

#### 3.4.3 Übertragen der Vorspannung

Die Übertragung der Vorspannung wurde nach 4 Tagen vorgenommen. Die Würfeldruckfestigkeit betrug i.M.  $44.8 \text{ N/mm}^2$  (s. Tab. 5). Die Vorspannung wurde stetig in drei Stufen übertragen, wobei in den Haltezeiten der Schlupf und nach dem Übertragen Gesamtschlupf und Betondehnung ermittelt wurden; zusätzlich bei den drahtbewehrten Versuchskörpern die Stahldehnungen.

Die Ausziehversuche wurden am gleichen Tag bzw. - versuchstechnisch bedingt - einen Tag später durchgeführt.

#### 3.4.4 Lagerung der Versuchskörper bis zum Versuch

Nach dem Übertragen der Vorspannung wurden die Meßuhren zur Bestimmung des Schlupfes vorläufig entfernt und die Spannstähle zwischen den Versuchskörpern mit einer Trennscheibe durchgeschnitten. Die Versuchskörper lagerten dann bis zum Prüftermin bei rd  $20^\circ \text{C}$  und 55 % r.F. im Keller des Instituts.

Tab. 5: Festigkeitsentwicklung des Betons  $\beta_{w15}$   
(ermittelt an Würfeln mit 15 cm Kantenlänge)

Serie	4 Tage	28 Tage	~ 260 Tage
DO/LO	44.0	66.0	66.0
DI	50.0	70.0	73.0
DII	46.0	70.0	70.0
DIII	47.0	66.0	68.0
LI	44.0	66.0	66.0
LII	52.0	67.0	67.0
i.M. $\beta_{w15}$	47.2	67.5	68.4
bez. M $\beta_{w20}$	44.8	64.1	65.0

$$\beta_{w20} = 0.95 \cdot \beta_{w15}$$

### 3.5 Versuchsaufbau bei hohen Temperaturen

#### 3.5.1 Versuchsofen

Die Versuche wurden in einem elektrisch beheizten Ofen (Hersteller: NABER, Industrieofenbau) durchgeführt. Der Ofen war in Längsrichtung in drei Heizzonen unterteilt. Durch Herausnehmen des mittleren Teils konnte der Ofen auf die Versuchskörperlänge der spanndrahtbewehrten Körper verkürzt werden. Jede Heizzone hatte eine max. Heizleistung von 9 kW; das entsprach einer max. Aufheizgeschwindigkeit  $= 3^{\circ}\text{C}/\text{min}$ . Die Heizdrähte waren in den Seitenwänden und in der Bodenplatte

angeordnet. Auf der Bodenplatte konnten die Versuchskörper gelagert werden (s. Bild 3.5). Die Heizungsregelung erfolgte für jede Heizzone getrennt über Mantelthermoelemente, die in die Ofenwand eingebaut waren (Temperaturregelung über Ofenraumtemperatur).

Der Ofenraum wurde durch zwei Quarzlampen beleuchtet.

### 3.5.2 Lagerung der Versuchskörper

Die Versuchskörper wurden im Ofen als Vierfeldträger gelagert. Das mittlere Auflager war unverschieblich, die vier Seitenauflager waren als Rollenlager ausgebildet. Die Versuchskörper wurden parallel zur optischen Achse ausgerichtet; Seitenmittellinie der Versuchskörper in Höhe der Fernrohrachse.

### 3.5.3 Anordnung der Meßgeräte für die Untersuchungen bei hohen Temperaturen

Die Gesamtdehnung des Versuchskörpers wurde je Stirnfläche mit einem Quarzglasdilatometer aufgenommen. Der Quarzglasstab tastete dabei die Mitte der Stirnfläche an (s. 3.6.2).

Zur Messung des Schlupfes dienten zwei Röhrendilatometer, mit denen der Gesamtschlupf eines Stabes an den beiden Stirnflächen gemessen wurde (s. 3.6.2). Zur Ermittlung der Dehnungsverteilung über die Länge des Versuchskörpers wurde ein optisches Dehnmeßgerät eingesetzt, das parallel zur Seitenmittelachse der Versuchskörper verschoben werden konnte (s. 3.6.2).

Alle Versuchskörper waren in zwei Querschnitten mit je 6 Thermoelementen (Fe-Ko) ausgestattet. An den gleichen Stellen wurden die Oberflächentemperaturen der vier Seitenflächen bestimmt. Je ein Versuchskörper der D-Serie war mit jeweils 3 HT-DMS ausgestattet. Die Anordnung ist Bild 3.1 zu entnehmen.



### 3.6 Meßverfahren

#### 3.6.1 Meßverfahren bei Raumtemperatur

Der Öldruck der Vorspannpresen wurde durch Druckmanometer kontrolliert, der zugehörige Weg der beiden Hauptpressen mit einem Metermaß mit Millimetereinteilung. Die Kraft wurde zusätzlich für jeden Spannstahl einzeln über Ringkraftmeßdosen C 6 (50 t) GK o.5 der Firma 'Hottinger Baldwin Meßtechnik' kontrolliert. Die Schlupfmessungen wurden mit Meßuhren durchgeführt (Meßgenauigkeit 1/1000 mm).

Die Messungen der Betondehnungen erfolgte mit Setzdehnungsmeßgeräten (SDM). Jeder Versuchskörper wurde auf den beiden Seitenmittellinien mit Setzdehnungsmeßstrecken versehen; eine mit 100 mm Meßbasislänge, die andere mit 200 mm.

Die Messungen des Schlupfes an beiden Versuchskörperenden sowie die beiden SDM-Messungen wurden direkt nach dem Übertragen durchgeführt.

Nach dem Einlagern der Versuchskörper wurde der Schlupf an einem oben liegenden Spannstahlende sowie die SDM-Messung der 100-mm-Meßstrecke nach 1, 2, 4, 7, 28, 56, 84 Tagen und vor dem Versuch ermittelt (Anordnung der Meßeinrichtung s. Abb.3.1).

Nach dem Übertragen der Vorspannung wurden auch die Ausziehversuche an drei Ausziehkörpern durchgeführt. Gemessen wurde die Last sowie die Stabendverschiebung am lastfreien Ende. Die Last wurde stetig mit einer Spannungssteigerung von rd.  $50 \text{ N/mm}^2 \text{ sec}$  bis zum Versagen gesteigert.

#### 3.6.2 Meßverfahren unter hohen Temperaturen

Die Temperaturverteilung über den Querschnitt der Versuchskörper wurde in zwei Ebenen mit je 6 Thermoelementen (Eisen-Konstantan) ermittelt. Die Aufnahme der Temperaturen erfolgte mit einem Thermodrucker der Firma Philips.

Die Oberflächentemperatur der Versuchskörper wurde an den gleichen Meßebenen mit je 4 Thermoelementen (Nickel-Chrom) ermittelt und von einem 12-Punkt-Drucker der Firma Philips ausgedruckt. Die Temperaturregelung des Ofens erfolgte in 3 Zonen in Längsrichtung (D-Körper: 2 Zonen). Hierzu wurde eine Regelanlage der Firma Eurotherm verwendet.

Die Gesamtdehnung der Versuchskörper während des Aufheizens wurde mit einem Quarzglasdilatometer je Seite aufgenommen. Die Dehnungen wurden hierbei über einen auf die Mitte der Stirnflächen gedrückten Quarzglasstab aus dem Ofen auf ein Parallelenkersystem übertragen. Verbunden mit diesem System war ein induktiver Wegaufnehmer, dessen Taststift gegen ein Widerlager geführt wurde (s. Bild 3.6).

Zur Messung des Schlupfes wurde ein Röhrendilatometer aus Quarzglas entwickelt (s. Bild 3.7). Ein Quarzglasrohr wurde durch ein Federsystem auf den Versuchskörper gedrückt, durch eine zweite, schwächere Feder ein Glasstab auf den Spannstahl. Der Glasstab wurde durch angeklebte Glasringscheiben und ringlinienförmig angeordnete Isolierwolle verschieblich gegenüber dem Rohr gelagert. Der induktive Wegaufnehmer wurde im Aufnahmering des äußeren Federsystems befestigt und der Taststift des Wegaufnehmers gegen den Quarzglasstab gedrückt. Dieses Meßsystem erfaßte den reinen Schlupf des Spannstahles. Die Dehnungen des Versuchskörpers und die des Meßsystems infolge der Temperatur wurden kompensiert.

Zur Erfassung der partiellen Betondehnungen des Versuchskörpers in Höhe der Seitenmittellinie wurde für die Hochtemperaturversuche, in Anlehnung an die direkte Meßmethode mit manuellen Setzdehnungsmessern bei Raumtemperatur, ein optisches Dehnmeßgerät (ODM) entwickelt (s. Bild 3.3).

Auf einem parallel zum Versuchskörper aufgebauten Stahlträger wurde eine optische Meßbank, bestehend aus drei 1 m langen Dreikantschienen, befestigt. Die Meßbank wurde mit einem Nivelliergerät und Theodolith auf Höhe, Seite und Verdrehung justiert. Das ODM bestand aus einer Meßuhren- und Fernrohrhalterung, die getrennt auf der Meßbank verschiebbar waren. Die Kontrolle der exakten Ausrichtung beider Teile erfolgte jeweils im ersten Teilschritt jeder Messung durch Überprüfen des reibungsfreien Zusammenfahrens der passig gearbeiteten Fingerzüge. Nach dem Einrichten der Meßuhr mit dem Fernrohr auf dem linken Meßpunkt einer der rd 200 mm langen Meßstrecken wurde die Fernrohrhalterung auf den rechten Meßpunkt eingerichtet und mit einem Feintrieb justiert. Durch Einlegen eines 200-mm-Endmaßes konnte die Längenänderung dieser Meßstrecke in Temperaturschritten an der Meßuhr abgelesen werden.

Zur Messung der Stahldehnungen wurden Hochtemperaturdehnmeßstreifen der Firma MICRO-EPSILON eingesetzt. Die DMS waren total gekapselt und so gegen Feuchteeinwirkung und Dampfdruck geschützt. Sie wurden werkseitig auf die Temperaturdehnzahl des zu untersuchenden Materials angepaßt und waren als Halbbrücken-DMS temperaturkompensiert. Das Trägermaterial der DMS bestand aus Metall. Aufgrund der nur geringen Verformbarkeit in Querrichtung konnten die DMS nur an die Spanndrähte angepaßt und punktgeschweißt werden; für Litzen war ein Einsatz nicht möglich.

Die Erprobung der HT-DMS ist in |3.3| beschrieben.

#### 4. VERSUCHSERGEBNISSE

##### 4.1 Übertragungslängen nach dem Eintragen der Vorspannung

##### 4.1.1 Übertragungslängen, ermittelt aus Betondehnungen

Die Bilder 4.1 - 4.10 zeigen den Verlauf der Betondehnungen über die Versuchskörperlänge vom Zeitpunkt des Übertragens an bis zum Aufheizversuch im Alter von rd 260 d. Aus dem Verlauf der Betondehnungen kann die Eintragungslänge  $e$  direkt ermittelt werden. Sie ist die Länge zwischen Versuchskörperende und dem Querschnitt, bei dem die Betondehnungen ihren ersten Höchstwert erreichen. Da die so ermittelte Eintragungslänge  $e$  erfahrungsgemäß stark streut, wird nach [3.1] die Länge  $e_{80}$  ermittelt. Sie ergibt sich vom Versuchskörperende her gemessen bis zu jener Stelle, bei der 80 % der Vorspannkraft bzw. 80 % des mittleren Höchstwertes der Längsdehnung erreicht sind. Die Eintragungslänge  $e$  wird dann mit  $e = 1,35 \cdot e_{80}$  berechnet. Die so ermittelte Eintragungslänge  $e$  kann der Übertragungslänge  $\lambda_{\bar{u}}$  gleichgesetzt werden, da der Einfluß der Störungslänge  $s$  gering ist. Die Störungslänge  $s$  ist die Strecke, auf der gemäß dem Saint-Venantschen Prinzip die Spannungsspitzen der Einzelkräfte der Spannstähle in einen ebenen Spannungszustand übergeführt werden.

In Tab. 4.1 sind die gemäß [3.1] errechneten Übertragungslängen  $\lambda_{\bar{u}} = 1,35 \cdot e_{80}$  den direkt ermittelten Eintragungslängen  $e$  gegenübergestellt. Der Tabelle ist zu entnehmen, daß die Eintragungslänge  $e$  jeweils geringfügig größer ist. Die Abweichungen liegen jedoch im Bereich der Streuungen. In die Tabelle 4.1 mit aufgenommen wurden die rechnerischen Übertragungslängen gemäß DIN 4227. Der Verbundbeiwert  $k_1$  wurde gemäß [3.1] für beide Stahllarten zu  $k_1 = 65$  angenommen. Es ist zu erkennen, daß die Verbundbeiwerte für profilierte Drähte die Verbundwirkung der Drähte gut erfaßt. Die Verbundwirkung der Litzen wird hier jedoch unterschätzt.

Tab. 4.1: Übertragungslängen  $\ell_u$ , ermittelt aus Betondehnungen

Versuchskörper	$\epsilon_m$	$0.80 \epsilon_m$	$e_{80}$			$\ell_{\bar{u}} =$ $1.35 \cdot e_{80}$	$e$ (gemessen)	$\bar{\ell}_{\bar{u}} =$ $k_1 d_z$ (DIN 4227)
	$\%$	$\%$	$\ell^{1)}$ cm	r cm	i.M. cm	cm	cm	cm
DI/1	0,46	0,37	16,5	19,0	17,8	24,0	27,5	
DI/2	0,40	0,32	24,5	13,0	18,8	25,3	(42,5)	
DI/3	0,47	0,38	22,5	29,0	25,8	34,8	32,5	
DI/m	0,44	0,36	21,2	20,3	20,8	28,0	30,0	36,6 <sup>2)</sup>
DIII/1	0,51	0,40	19,5	30,5	25,0	33,8	37,5	
DIII/2	0,54	0,43	21,0	19,5	20,3	27,4	27,5	
DIII/3	0,30	0,24	25,0	15,0	20,0	27,0	32,5	
DIII/m	0,45	0,36	21,8	21,7	21,8	29,4	32,5	48,75
LI/1	0,52	0,42	32,5	27,5	30,0	40,5	37,5	
LI/2	0,41	0,33	23,5	24,0	23,8	32,1	32,5	
LI/m	0,47	0,38	28,0	25,8	26,9	36,3	35,0	60,9 <sup>2)</sup>
LII/1	0,56	0,46	14,5	35,5	25,0	33,8	37,5	
LII/2	0,56	0,45	28,0	38,0	33,25	44,9	47,5	
LII/m	0,56	0,455	21,3	37,0	29,1	39,3	42,5	81,25

<sup>1)</sup> Entspannende      <sup>2)</sup> linear interpoliert

#### 4.1.2 Übertragungslängen, ermittelt aus den Schlupfwerten der Spannstähle

Die Übertragungslängen lassen sich auch näherungsweise anhand des Schlupfes der Spannstähle ermitteln. Gemäß RILEM [3.4] errechnet sich die Übertragungslänge  $l_{\ddot{u}}$  mit

$$l_{\ddot{u}} = 3,5 \cdot \frac{E_z}{\beta_s} \cdot \delta_{zm} \quad (4.1)$$

Hierin ist der mittlere Schlupf des Spannstahles  $\delta_{zm}$ , gemessen 7 Tage nach dem Übertragen der Vorspannung, einzusetzen.

In (4.1) wird unabhängig von der Spannstahlart von einem sinusförmigen Verlauf der Spannstahlspannungen ausgegangen, wobei die Formänderungen des Betons nicht berücksichtigt werden. Als Spannbettspannung wird  $\sigma_z^0 = 0.8 \beta_s$  gefordert.

Gemäß FIP [3.5] errechnet sich die Übertragungslänge näherungsweise zu

$$l_{\ddot{u}} = \beta \cdot \frac{E_z}{\sigma_z} \cdot \delta, \quad (4.2)$$

wobei  $\beta$  dem Völligkeitsgrad der Einleitungskurve entsprechend gewählt werden muß. Hierbei ist für den

- linearen Stahlspannungsverlauf  $\beta = 2$
- parabolischen Stahlspannungsverlauf  $\beta = 3$
- für schlagartige Übertragungen  $\beta = 4$

zu setzen.

Berücksichtigt man zusätzlich die Betonverformungen im Einleitungsbereich, so errechnet sich die Übertragungslänge mit

$$l_{\ddot{u}} = \alpha \cdot \frac{E_z}{\sigma_z} \cdot \delta, \quad (4.3)$$

wobei nach Umformungen  $\alpha$  sich zu

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + n\mu (b - \beta \cdot b + \beta)} \quad \text{ergibt} \quad (4.4)$$

mit  $n = E_z/E_b$

$\mu = A_z/A_b$  .

Der Faktor  $b > 1$  wird eingeführt, um die Betonverformungen um den Stahl zu berücksichtigen. Der Einfluß von  $b$  ist jedoch gering.

In Tab. 4.2 sind die Schlupfwerte nach dem Übertragen der Vorspannung zusammengestellt. Eine Unterscheidung des Schlupfes je Seite konnte nicht getroffen werden, jedoch nach der Lage der Spannstähle.

Tab. 4.2: Schlupf nach dem Übertragen der  
Vorspannung

Versuchs- körper	$\sigma_z^{o*}$ (vor Übertragen)	Schlupf nach Übertragen			7 Tage i.M.
		unten	oben	i.M.	
-	N/mm <sup>2</sup>	mm	mm	mm	mm
DI/1		0,470	0,421		
DI/2		0,566	0,595		
DI/3		0,836	0,653		
DI/m	904,4	0,624	0,566	0,60	0,63
DIII/1		0,812	0,819		
DIII/2		0,867	0,751		
DIII/3		0,740	1,179		
DIII/m	1193,0	0,806	0,916	0,86	0,88
LI/1		0,473	0,615		
LI/2		0,509	0,874		
LI/m	995,0	0,491	0,745	0,62	0,71
LII/1		0,580	1,232		
LII/2		0,500	0,764		
LII/m	1254,0	0,540	0,998	0,77	0,79

\* Die Spannungen entsprechen den vor dem Übertragen mit den Kraftmeßdosen ermittelten Lasten. Sie sind höher als die Spannungen  $\sigma_z^o$  in Versuchskörpermitte, da aufgrund der Abkühlung und des Schwindens des noch jungen Betons Verkürzungen auftreten, die zur Spannungssteigerung führen. Für die Übertragung muß jedoch diese erhöhte Spannung angesetzt werden.



Die oberliegenden Spannstähle zeigen außer bei den Versuchskörpern mit den geringer vorgespannten Drähten erwartungsgemäß größere Schlupfwerte als die untenliegenden Spannstähle; die oberliegenden Litzen weisen nahezu die doppelten Schlupfwerte auf. Der Verlauf der Schlupfwerte beim Übertragen ist in den Bildern 4.11 und 4.12 dargestellt.

Mit den je Serie und Lage gemittelten Schlupfwerten lassen sich mit (4.1) - (4.3) die Übertragungslängen näherungsweise berechnen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.3 zusammengestellt. Zur Ermittlung der Übertragungslänge  $l_{\bar{u}}$  gemäß (4.1) wurde die Stahlspannung mit  $\beta_s$  und der Schlupf nach 7 Tagen angenommen. Zur Ermittlung der Übertragungslängen  $l_{\bar{u}}$  gemäß (4.2) wurde von den mittleren Stahlspannungen  $\sigma_z$  in Versuchskörpermitte ausgegangen, die sich nach dem Übertragen der Vorspannung anhand der mittleren Betondehnungen ermitteln lassen.

Aufgrund der geringeren bezogenen Rippenfläche  $f_R$  der Litze wurde für den Völligkeitsgrad ein parabolischer Stahlspannungsverlauf angenommen ( $\beta = 3$ ) und für die Drähte ein linearer ( $\beta = 2$ ).

Bei der Ermittlung der Übertragungslängen  $l_{\bar{u}}$  gemäß (4.3) wurde anhand des Faktors  $b$  der Einfluß der Betondeckung und die Höhe der Vorspannung berücksichtigt. Ein Vergleich der drei berechneten Übertragungslängen mit den anhand der Betondehnungen ermittelten Übertragungslängen  $l_{\bar{u}} = 1.35 \cdot e_{80}$  zeigt, daß der Ansatz (4.3) nahezu die gleichen Werte erbringt.

Tab. 4.3: Übertragungslängen  $l_{\ddot{u}}$ , ermittelt aus den Schlupfwerten

Versuchs- serie	$\beta_s$	$l_{\ddot{u}}$ (4.1)	$\sigma_z$	$\beta$	$l_{\ddot{u}}$ (4.2)	n	$\mu$	b	$\alpha$ (4.4)	$l_{\ddot{u}}$ (4.3)
	N/mm <sup>2</sup>	cm	N/mm <sup>2</sup>	-	cm	-	$\cdot 10^{-2}$	-	-	
DI	1470	33,5	812,7	2,0	30,8	9,5	1,32	1,25	1,83	28,1
DIII	1470	46,8	1099,2	2,0	32,6	9,5	0,98	1,5	1,91	31,1
LI	1570	34,1	860,5	3,0	43,4	9,1	1,27	1,0	2,69	38,9
LII	1570	37,9	1140,4	3,0	40,7	9,1	1,27	1,5	3,00	40,7

#### 4.1.3 Übertragungslängen, ermittelt aus Ausziehversuchen

Nach [4.1] muß die Änderung der Verschiebung  $\Delta$  auf der Strecke  $dx$  der Differenz von Stahl und Betondehnung gleich sein. Die Änderung der Stahlzugkraft entspricht der durch Verbund eingeleiteten Kraft:

$$\frac{d\Delta}{dx} = \frac{\sigma_{zx}}{E_z} \pm \frac{\sigma_{bx}}{E_b} = \frac{\sigma_{zx}}{E_z} (1 \pm \mu n) \quad (4.5)$$

$$\frac{d\sigma_{zx}}{dx} = \frac{\Sigma u}{F_z} \cdot \tau_x \quad (4.6)$$

daraus folgt mit der von Rehm [4.1] gefundenen Beziehung (4.7)  $\tau_x = f(\Delta)$  (Verbundgesetz) die Differentialgleichung

$$\frac{d^2\Delta}{dx^2} = \frac{1 + \mu \cdot n}{E_z} \cdot \frac{\Sigma u}{F_z} \cdot f(\Delta). \quad (4.8)$$

Zur Lösung der Differentialgleichung muß der grundsätzliche Zusammenhang zwischen Verbundspannung und Verschiebung anhand von Ausziehversuchen mit kurzer Verbundlänge ermittelt werden. Als zweckmäßig haben sich hierfür kurze Verbundlängen von  $5 \cdot d_z$  erwiesen. Die experimentell gewonnenen Last-Verschiebungsbeziehungen lassen sich in auf die Druckfestigkeit des Betons bezogenen Form darstellen:

$$\tau/\beta_w = a_0 + b_0 \cdot \Delta^{c_0}. \quad (4.9)$$

Für die Lösung der DGL hat Martin [3.6] eine Näherungslösung durch schrittweise Integration angegeben. An der Stelle  $x = l_u$  gilt die Randbedingung  $\Delta = 0$ ,  $\sigma_{zx} = \text{const} = \sigma_z$ .

Anhand von zum Zeitpunkt des Übertragens durchgeführten Ausziehversuchen wurde die Last-Verschiebungsbeziehung für die verwendeten Litzen und Spanndrähte ermittelt.

Die Verbundgesetze sind in Bild 4.13 dargestellt. In Tabelle 4.4 sind die Rechenwerte  $a_o$ ,  $b_o$  und  $c_o$  aufgeführt.

Tab. 4.4: Rechenwerte der Grundgesetze

Versuchs- serie	$a_o$	$b_o$	$c_o$
DI	0,009	0,230	0,45
DIII	0,012	0,186	0,41
LI/II	0,046	0,105	0,455

Mit dem Ansatz von Martin [3.6] lassen sich für die jeweiligen Spannungen im Versuchskörper der Verlauf der Stahlspannungen, Verbundspannungen und der relativen Stahlverschiebungen ermitteln, die in Bild 4.14 dargestellt sind. Daraus lassen sich die Übertragungslängen bestimmen. Tabelle 4.5 enthält die Stabendverschiebungen und die Übertragungslängen  $l_{\ddot{u}}$ .

Tab. 4.5: Stabendverschiebungen und Übertragungslängen, ermittelt aus Verbundgrundgesetzen

Versuchs- serie	$v$	$l_{\ddot{u}}$
	mm	cm
DI	0,54	49,5
DIII	0,90	51,8
LI	0,95	55,3
LII	1,49	66,4

Ein Vergleich der gemessenen Schlupfwerte (Tab. 4.2) mit den gerechneten zeigt, daß die Ergebnisse für die Drähte gut übereinstimmen, die der Litzen hingegen weichen stark von ihnen ab. Ein Vergleich der gerechneten Übertragungslängen ist in Tabelle 4.6 enthalten.

#### 4.1.4 Übertragungslängen, ermittelt aus dem Stahlspannungsverlauf mit DMS

Mit Hilfe der aufgepunkteten Dehnmeßstreifen war es möglich, den Stahlspannungsverlauf näherungsweise zu bestimmen. In den Versuchskörpern DI/2 und DIII/2 wurden jeweils 3 DMS auf einem obenliegenden Draht eingesetzt. Die Lage der DMS und der ermittelte Spannungsverlauf, direkt nach dem Übertragen, ist den Bildern 4.15 und 4.16 zu entnehmen. Zum Vergleich sind die anhand der Verbundgrundgesetze ermittelten Stahlspannungsverläufe dargestellt. Die ermittelten Übertragungslängen sind in Tabelle 4.6 enthalten.

#### 4.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Eine Zusammenfassung der ermittelten Übertragungslänge gibt Tabelle 4.6.

Tabelle 4.6: Zusammenfassung der Übertragungslängen

Versuchs- serie	$l_{\ddot{u}} =$ $1.35 \cdot e_{80}$	$l_{\ddot{u}} =$ $\alpha \cdot \frac{E}{\sigma_z} \cdot \delta$	$l_{\ddot{u}} =$ $f(\Delta)$	$l_{\ddot{u}}$ $(\sigma_z)$	e (gemessen)	$\bar{l}_{\ddot{u}} =$ $k_1 \cdot d_z$
	cm	cm	cm	cm	cm	cm
DI	28,0	28,1	49,5	~29,5	30,0	36,6
DIII	29,4	31,1	51,8	~37,0	32,5	48,8
LI	36,3	38,9	55,3	-	35,0	60,9
LII	39,3	40,7	66,4	-	42,5	81,3

Hieraus ist zu ersehen, daß die mit Hilfe der Verbundgesetze ermittelten Übertragungslängen bedeutend größer als die nach den anderen Verfahren ermittelten sind, aber immer noch kleiner als die nach DIN 4227 berechneten.

## 4.2 Zeitabhängige Veränderungen bei Raumtemperatur

### 4.2.1 Schwindverformungen

Die Schwinddehnungen wurden an den nicht vorgespannten Versuchskörpern DI/O, DIII/O, LO bestimmt. Die in den Bildern 4.17 und 4.18 dargestellten mittleren Dehnungen wurden an einer Seitenmittellinie mit dem SDM (100mm Meßstrecke) bestimmt. Zur Kontrolle wurden die Dehnungen der Schwindkörper ermittelt. DIII/O zeigte ungewöhnlich große Verformungen, die aber auch an dem Schwindkörper gemessen wurden.

### 4.2.2 Zeitabhängige Verformungen der vorgespannten Versuchskörper

Die Bilder 4.17 und 4.18 enthalten neben den reinen Schwinddehnungen der nicht vorgespannten Versuchskörper auch die gesamten zeitabhängigen Dehnungen der vorgespannten Versuchskörper. Die dargestellten Dehnungen enthalten sowohl den elastischen Anteil infolge Vorspannung als auch die zeitabhängigen Verformungsanteile aus Kriechen und Schwinden. Die dargestellten Dehnungen sind die Mittelwerte der Betondehnungen, wie sie den Bildern 4.1 - 4.10 zu entnehmen sind.

Tab. 4.7 zeigt die sich ergebenden Stahl- und Betonspannungen nach rd. 260 Tagen, ermittelt aus den Mittelwerten der Betondehnungen der beiden Seitenmittellinien (SDM-Meßstrecken 100 mm, 200 mm).

### 4.2.3 Zeitabhängige Schlupfänderungen

Die Veränderung der Stabendverschiebung konnte nicht kontinuierlich aufgenommen werden. Beim Durchtrennen der Spannstähle

nach dem Übertragen der Vorspannung mußten die Uhren abgenommen werden. Gerade aber durch das mechanische Trennen der Spannstähle wird der Einleitungsbereich sicherlich beeinflusst. Die in Bild 4.19 dargestellten Veränderungen der Stabendverschiebungen geben nur den Verlauf nach Einlagerung der Versuchskörper an. Sie stellen Mittelwerte aus der jeweiligen Serie dar. Bis auf die gering vorgespannte D-Serie zeigen alle Versuchskörper eine geringfügige Schlupfzunahme.

Tab. 4.7: Stahl- und Betonspannungen vor Hochtemperaturversuch

Versuchskörper	$\sigma_z^0$ N/mm <sup>2</sup>	$\Delta \varepsilon_b$ (100) %	$\Delta \varepsilon_b$ (200) %	$\Delta \varepsilon_b$ i.M. %	$\sigma_z$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_b$ N/mm <sup>2</sup>
DI/1	882.8	1.44	1.36	1.40	591.0	7.79
DI/2		1.52	1.30	1.41	589.0	7.76
DI/3		1.57	1.29	1.43	584.8	7.71
DI/m		1.51	1.32	1.41	588.3	7.75
DIII/1	1176.0	1.73	1.53	1.63	836.3	8.22
DIII/2		1.86	1.55	1.71	819.6	8.06
DIII/3		1.72	1.69	1.71	819.6	8.06
DIII/m		1.77	1.59	1.68	825.2	8.11
LI/1	942.0	1.88	1.46	1.67	606.3	7.68
LI/2		1.79	1.41	1.60	620.4	7.86
LI/m		1.84	1.45	1.64	613.4	7.77
LII/1	1254.0	1.99	1.47	1.73	908.3	11.50
LII/2		1.97	1.67	1.82	890.2	11.27
LII/m		1.98	1.57	1.78	899.3	11.39

#### 4.2.4 Veränderung der Stahlspannungen (DI/2, DIII/2)

Die Bilder 4.20 und 4.21 zeigen die Dehnungsänderung der Spanndrähte sowie die sich daraus ergebenden Stahlspannungsänderungen. Die Werte der Dehnungszunahme  $\Delta \epsilon_z$  außerhalb der Eintragungslänge (DMS 2 und 3) stimmen in guter Näherung mit den gemessenen Betondehnungen überein. Die Dehnungszunahme im Eintragungsbereich ist in den ersten 1000 Minuten deutlich größer als im Mittelbereich. Dies führt zur Vermutung, daß sich die Eintragungslänge zeitabhängig verändert. Während im Mittelbereich das Betonkriechen die Dehnungsänderung bestimmt, können die größeren Dehnungsänderungen im Einleitungsbereich nur durch zusätzliches Verbundkriechen der Spanndrähte erklärt werden. Dies muß dann aber auch zu einer kriechbedingten Verlängerung der Eintragungslänge  $e$  führen.

Die Bilder 4.22 und 4.23 zeigen in isometrischer Darstellung die zeitliche Veränderung der Stahlspannungen über die halbe Balkenlänge. Hieraus wird deutlich, daß die Spannungen im Mittelbereich infolge Betonkriechen und Schwinden gleichmäßig absinken.

Durch Projektion der Schnittpunkte der 'Eintragungsgeraden' mit der Geraden des Spannungsniveaus im Mittelbereich auf die Grundfläche erhält man näherungsweise den Verlauf der Eintragungslänge. Bis zum zweiten Tage vergrößert sich die Eintragungslänge, danach ist keine Veränderung mehr zu erkennen.

#### 4.2.5 Veränderung der Übertragungslängen

Wie in 4.2.4 beschrieben, ist nach 2 Tagen keine wesentliche Änderung der Eintragungslänge mehr zu erwarten. Bestimmt man die Betondehnungen nach 7 Tagen, so müßte man den endgültigen Wert der Eintragungslänge näherungsweise bestimmen können. Um die rein lastabhängige Veränderung zu erhalten, sind die Schwindverkürzungen zu berücksichtigen. Tab. 4.3 enthält sowohl die Übertragungslängen direkt nach dem Übertragen als auch



nach 7 Tagen, ermittelt aus den Dehnungen der Seitenmittellinie (Bild 4.1 - 4.10). Bei den Versuchsserien DI, LI und LII sind geringfügige Zunahmen der Eintragungslängen zu erkennen, jedoch nicht in der von dem DMS angezeigten Größe (DIII  $\Delta e(t) \approx 6$  cm). (Aufgrund der sehr großen Schwindwerte der DIII-Serie konnte keine Vergrößerung der Übertragungslänge ermittelt werden.)

Tab. 4.8: Übertragungslängen  $\ell_{\bar{u}}$  (aus Betondehnungen)  
nach dem Übertragen und nach 7 Tagen

Versuchskörper	$0,80 \cdot \epsilon_m$	$0,80 \cdot \epsilon_m$	$\epsilon_s$	$0,80 \cdot \bar{\epsilon}_m$	$e_{80}^{(0)}$			$e_{80}^{(7)}$			$1,35 \cdot e_{80}$	$1,35 \cdot e_{80}$
	(0)	(7)	(7)	(7)	$\ell$	$r$	$m$	$\ell$	$r$	$m$	(0)	(7)
	%	%	%	%	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
DI/1	0,37	0,68	0,004	0,68	16,5	19,0	17,8	19,0	21,0	20,0	24,0	27,0
DI/2	0,37	0,65	0,004	0,65	29,5	15,0	22,3	32,5	20,5	26,5	30,1	35,8
DI/3	0,38	0,58	0,004	0,58	22,5	29,0	25,8	25,0	17,5	21,25	34,8	28,7
DI	0,37	0,64	0,004	0,64	22,8	21,0	21,9	25,5	19,7	22,6	29,6	30,5
DIII/1	0,40	0,73	0,208	0,47	19,5	30,5	25,0				33,8	
DIII/2	0,43	0,77	0,208	0,51	21,0	19,5	20,3				27,4	
DIII/3	0,24	0,58	0,208	0,32	25,0	15,0	20,0				27,0	
DIII	0,36	0,69	0,208	0,43	21,8	21,7	21,8			-	29,4	-
LI/1	0,42	0,78	0,010	0,77	32,5	27,5	30,0	22,5	30,5	26,5	40,5	35,8
LI/2	0,33	0,76	0,010	0,75	23,5	24,0	23,8	(35,5)	24,0	29,8	32,1	40,2
LI	0,38	0,77	0,010	0,76	28,0	25,8	26,9	29,0	27,3	28,1	36,3	37,9
LII/1	0,46	0,78	0,010	0,77	14,5	35,5	25,0	14,5	32,5	23,5	33,8	31,7
LII/2	0,45	0,66	0,016	0,65	28,0	38,0	33,25	32,5	38,5	35,5	44,9	47,9
LII	0,455	0,72	0,010	0,71	21,3	37,0	29,1	23,5	35,5	29,5	39,3	39,8

## 5. ERGEBNISSE DER HAUPTUNTERSUCHUNGEN

### 5.1 Temperaturabhängige Veränderungen der Materialeigenschaften der Baustoffe

#### 5.1.1 Veränderungen der Stahleigenschaften

In Bild 5.1 sind die aus Warmkriechversuchen ermittelten Spannungs-Dehnungslinien für die beiden verwendeten Spannstähle dargestellt. Hierbei wurden die Spannungen unter erhöhten Temperaturen auf die Streckgrenzenspannung  $\sigma_{0,2}$  bei Raumtemperatur bezogen. Es ist deutlich zu erkennen, daß der Temperatureinfluß auf die Spannstahllitze bis 300 °C gering ist, während beim Spanndraht schon ab 200 °C eine deutliche Erweichung zu verzeichnen ist.

Das Warmkriechverhalten der Spannstähle ist in Bild 5.2 dargestellt. Bei den Spanndrähten werden die Kriechkurven für die vor dem Versuch vorhandenen Stahlspannungen ( $DI \approx 0.4 \sigma_{0.2}$ ,  $DIII \approx 0.6 \sigma_{0.2}$ ) geradlinig interpoliert. Der Darstellung ist zu entnehmen, daß Litzen bei gleicher Temperatur und Spannung geringere Kriechdehnungen zeigen als die Spanndrähte.

Für die Relaxationsverluste unter hohen Temperaturen wurden keine eigenen Untersuchungen durchgeführt. Sie können nur aus den Versuchsergebnissen abgeschätzt werden, die in [5.1] 5.2 | 5.3 | veröffentlicht wurden. Die dort berichteten Ergebnisse sind in Bild 5.3 dargestellt; sie gelten näherungsweise für hochfeste Spannstähle. Hiernach ist für die in den Versuchskörpern vorliegenden Spannungen mit Spannungsverlusten von bis zu 50 % zu rechnen.

In Bild 5.4 ist die Veränderung des auf Raumtemperatur bezogenen E-Moduls der Spannstähle in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Da die Werte für Spanndraht und Litze nur gering voneinander abweichen, wurde nur eine Linie dargestellt.

### 5.1.2 Veränderungen der Betoneigenschaften

In Bild 5.5 ist die temperaturabhängige Veränderung der Druckfestigkeit des verwendeten Betons dargestellt. Diese Werte konnten aus Versuchsergebnissen von Mörtel und Beton anderer Zusammensetzung abgeschätzt werden [5.6]. Ein Vergleich mit der gemäß CEB-FIP Model Code [5.4] vorgesehenen temperaturabhängigen Veränderung der Druckfestigkeit zeigt ab 250°C gute Übereinstimmung.

Die Abminderung des E-Moduls durch hohe Temperaturen ist in Bild 5.4 dargestellt. Neben den temperaturabhängigen Verläufen der E-Moduli von Stahl und Beton ist auch noch der Verlauf von  $n(\vartheta) = E_e(\vartheta)/E_b(\vartheta)$  aufgetragen. Dieser bestimmt als Steifigkeitswert auch das Verhältnis der Spannungen in beiden Stoffen im ideellen Verbundquerschnitt

Schneider [5.5] gibt zur Abschätzung des Einflusses der instationären Kriechdehnung auf die Gesamtdehnung folgenden formelmäßigen Zusammenhang an:

$$\varepsilon_{\text{ges}} = \varepsilon_{\text{th}} + \varepsilon_{\text{IK}} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_{\text{IK}} = \frac{\sigma}{E(\vartheta)} (1 + \varphi(\vartheta)) \quad (5.2)$$

$$\varphi(\vartheta) = C_1 \cdot \tanh \cdot \gamma_1 (\vartheta - \vartheta_0) \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} \text{mit } C_1 &= 2.51 \\ \gamma_1 &= 2.72 \cdot 10^{-3} \\ \vartheta_0 &= 20^\circ\text{C} \end{aligned}$$

Setzt man näherungsweise voraus, daß sich die kriecherzeugende Spannung während des Aufheizens nicht ändert, so erhält man mit (5.1) die Gesamtdehnung während des Aufheizens. Diese Gesamtdehnung enthält nach [5.5] alle instationären Einflüsse, also auch das Schwinden. Die Ergebnisse der Rechnung für die Versuchskörper DI, DIII, LI ( $\sigma \approx 8,1 \text{ N/mm}^2$ ) und für LII ( $\sigma \approx 11,4 \text{ N/mm}^2$ ) sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt und in Bild 5.6 dargestellt.

Tab. 5.1 Berechnung der instationären Dehnungsänderungen unter konstanter Last  
nach Schneider | 5.5 |

Temperatur  °C	$\epsilon_{th}$	$\varphi(\vartheta)^{1)}$	E (°)	DI, III, LI	LII	DI, III, LI	LII
				$\epsilon_{IK}^{2)}$	$\epsilon_{IK}^{2)}$	$\epsilon_{ges}^{3)}$	$\epsilon_{ges}^{3)}$
	%	-	N/mm <sup>2</sup>	%	%	%	%
20	0	0	30.000	0	0	0	0
100	0,57	0,54	23.700	- 0,53	- 0,74	0,04	- 0,74
200	1,82	1,14	18.000	- 0,96	- 1,36	0,86	0,46
300	3,05	1,61	14.700	- 1,44	- 2,02	1,61	1,03
400	4,90	1,95	12.000	- 1,99	- 2,80	2,91	2,10
500	8,32	2,17	7.200	- 3,57	- 5,02	4,75	3,30
600	15,73	2,30	3.600	- 7,43	- 10,45	8,30	5,28
700	18,79	2,39	2.400	- 11,44	- 16,10	7,35	2,69
800	18,89	2,44	1.800	- 15,48	- 21,79	3,41	- 2,90

40

$$1) \quad \varphi = 2,51 \cdot \tanh \gamma_1 (\vartheta - \vartheta_0)$$

$$2) \quad \epsilon_{IK} = \frac{\sigma}{E(\vartheta)} (1 + \varphi(\vartheta))$$

$$3) \quad \epsilon_{ges} = \epsilon_{th} + \epsilon_{IK}$$

### 5.1.3 Verbunduntersuchungen

#### 5.1.3.1 Verbundverhalten unter konstanten Temperaturen

Die in den Bildern 5.7 - 5.9 dargestellten Verbundgesetze für die verwendeten Spannstähle wurden anhand von Ausziehversuchen unter konstanten Temperaturen ermittelt. Die Betondeckung der exzentrisch einbetonierten Stäbe entsprach jeweils der im Versuchskörper.

Ein Vergleich der Spannungs-Verschiebungskurven von Spanndraht macht deutlich, daß mit Zunahme der Betondeckung  $c$  von  $2,5 d_v$  auf  $3,7 d_v$  die Verbundbruchspannungen zwar bis einschließlich  $400^{\circ}\text{C}$  nahezu auf den doppelten Wert ansteigen. Bis zu einer Stabendverschiebung von 1 mm werden jedoch über den gesamten untersuchten Temperaturbereich, unabhängig von der Betondeckung, nahezu die gleichen Verbundspannungen erreicht. Das Verbundverhalten der Litzen unterscheidet sich deutlich von dem der Spanndrähte.

Bei Raumtemperatur ist der Haftanteil bedeutend höher. Nach Überwindung der Haftung ist eine Laststeigerung nur mit geringer Stabverschiebung verbunden. Ab einem Schlupf von rd 0,1 mm ist nur eine geringe weitere Laststeigerung möglich, die aber mit sehr großen Stabendverschiebungen verbunden ist. Dieses Verhalten wurde in allen untersuchten Temperaturbereichen festgestellt, wobei Verschiebungen von z.T. bis zu 20 mm gemessen wurden.

#### 5.1.3.2 Verbundkriechen

In Bild 5.10 ist das Verbundkriechverhalten unter instationärer Temperaturbeanspruchung dargestellt. Die Versuche wurden an Versuchskörpern mit zentrisch einbetonierten Stäben durchgeführt. Die zylindrischen Ausziehkörper wurden bei Raumtemperatur belastet und dann unter konstanter Last mit  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  bis zum Versagen erwärmt. Dargestellt sind allein die Kriech-

verschiebungen; der Verschiebungsanteil aus Belastung und der Anteil aus unterschiedlicher thermischer Dehnung wurde nicht dargestellt. Die angegebenen Lastniveaus sind beim Spanndraht auf die Verbundbruchlast bei Raumtemperatur, bei der Litze jedoch auf die Last  $P_a$ , bei der die Stabendverschiebung stark zunimmt (die Bruchlast ist nahezu doppelt so groß), bezogen.

Aus dem Vergleich der Kriechkurven für die beiden Spannstahlarten wird deutlich, daß die Litzen bei niedriger Last nur ein geringes Verbundkriechen aufweisen, ab einer kritischen Temperatur jedoch ziemlich rasch versagen. Spanndrähte hingegen weisen mit steigender Temperatur zunehmende Kriechverschiebungen auf und zwar um so größer, je höher die Last gewählt wurde.

## 5.2. Versuchsergebnisse der Hauptuntersuchungen

### 5.2.1 Temperaturverteilung über den Querschnitt der Versuchskörper

In den Bildern 5.11 - 5.13 ist die Temperaturverteilung über den Querschnitt für jeweils eine Serie dargestellt. Die Versuchskörper wurden mit rund  $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$  aufgeheizt. Dem Bild 5.11 ist zu entnehmen, daß die Versuchskörper in Längsrichtung sehr gleichmäßig aufgeheizt wurden. Der maximale Temperaturunterschied zum gleichen Zeitpunkt beträgt rd  $40^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturdifferenz zwischen Oberflächen- und Innentemperatur beträgt im Mittel rd  $50^{\circ}\text{C}$ . Bei den DIII erhöht sich dieser Wert auf rd  $75^{\circ}\text{C}$  und bei den L-Körpern auf rd  $150^{\circ}\text{C}$ .

Die Spannstähle haben im Mittel eine Temperatur, die bei DI um rd  $30^{\circ}\text{C}$ , bei DIII um  $50^{\circ}\text{C}$  und bei den L-Körpern um  $75^{\circ}\text{C}$  unter der Oberflächentemperatur liegt. Die im weiteren genannten Temperaturen sind gemittelte Oberflächentemperaturen.

### 5.2.2 Thermische Dehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie (ODM)

Wie in Kap. 3.2.4 erläutert, wurde davon ausgegangen, daß anhand der Dehnungsmessung über die Seitenmittellinien an 200-mm-Meßstrecken Aussagen über die temperaturabhängige Veränderung der Eintragungslänge gewonnen werden können.

In den Bildern 5.14 - 5.26 sind die Betondehnungen jeder Meßstrecke über die Versuchskörperlänge sowie die hieraus abgeleiteten mittleren Dehnungen in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur der jeweiligen Messung dargestellt.

Da im Bereich der Übergänge der dreiteiligen optischen Meßbank z.T. starke Streuungen der Meßergebnisse auftraten, wurden diese Werte durch die mittlere Dehnung ersetzt, ebenso wie einzelne extreme Dehnungsspitzen bei DI O, DIII O, LII1 und LII,2. Messungen über 650°C waren mit diesem Verfahren nicht möglich, da bei diesen hohen Temperaturen die Quarzglaslampen im Ofen versagten.

In den Bildern 5.27 - 5.29 sind die mittleren Betondehnungen über die Temperatur aufgetragen. Diese Werte stimmen in guter Näherung mit den Ergebnissen der Gesamtdehnungen überein, so daß die aufgezeigten Einzelwerte trotz der starken Streuungen den gemittelten Dehnungsverlauf über die Versuchskörperlängsachse annähernd wiedergeben.

### 5.2.3 Thermische Gesamtdehnungen

In Bild 5.30 sind für den vollständigen Temperaturgang die Dehnungen der Baustoffe allein sowie die der O-Körper dargestellt. Die Bilder 5.31 - 5.33 enthalten die Dehnungen der einzelnen Versuchskörper. Die dargestellten Kurven sind Mittelwerte der Messungen an beiden Stirnseiten.



#### 5.2.4 Stabendverschiebungen

In den Bildern 5.34 - 5.36 sind die mittleren Stabendverschiebungen in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Positiv ist eine Stabendverschiebung, wenn der Spannstahl hineinschlupft. Für die nicht vorgespannten Versuchskörper wurde die Stabendverschiebung als Mittel der an beiden Seiten eines Spannstahls gemessenen Verschiebung dargestellt. Für die vorgespannten Körper wurde das Mittel aus allen gemessenen Stabendverschiebungen gebildet.

#### 5.2.5 Stahldehnungen der mit Spanndraht vorgespannten Versuchskörper DI/2 und DIII/2

Die Versuchskörper DI/2 und DIII/2 waren jeweils mit drei Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen versehen. Die ermittelten Stahldehnungen sind in den Bildern 5.37 und 5.38 dargestellt.

Die DMS sind zwar als Halbbrücken-DMS temperaturkompensiert, doch mußten die gemessenen Werte gemäß der Angaben des Herstellers korrigiert werden. Berücksichtigt wurden die temperaturabhängigen Veränderungen der k-Faktoren, die temperaturabhängige Veränderung der Kabelwiderstände sowie die Nichtlinearität der scheinbaren thermischen Dehnung (Bow-Kurve). Die dargestellte Kurve wurde punktweise berechnet und als Linienzug dargestellt. Der DMS 1 des Versuchskörpers DIII/2 versagte in der Aufheizphase.

#### 5.3 Vorzeitiges Versagen der Versuchskörper

Die Versuchskörper LII/1, LII/2 sowie DIII/3 versagten während des Aufheizens schlagartig bei rd 340°C.

Während die Serie LII ( $0.8 \beta_s$ ) wie alle anderen Versuche mit einer Aufheizgeschwindigkeit von 1°C/min beheizt wurde, betrug sie beim Versuch DIII/3 rd 2,5°C/min. Bei der Serie LII rissen

die Versuchskörper nahezu entlang der Balkenmittellinie schlagartig auf. LII/2 wurde aufgrund der Erfahrung mit LII/1 mit einer lockeren Bandage versehen, wodurch der Schaden an der Versuchseinrichtung klein gehalten werden konnte.

Beim Versuch DIII/3 wurde jedoch der Versuchskörper explosionsartig zerstört, so daß die Bandage nur geringen Nutzen hatte.

#### 5.4 Versuchskörper nach dem Versuch

Die Abbildungen 5.39 - 5.47 zeigen einen Teil der Versuchskörper nach dem Versuch als Gesamtansicht. Detailabbildungen aus dem Verbundbereich geben einen Überblick über die Schädigung bei unterschiedlichen Temperaturen und Spannungen.

## 6. DISKUSSION DER VERSUCHSERGEBNISSE

### 6.1 Verhalten der spanndrahtvorgespannten Versuchskörper

In Bild 6.1 sind neben den mittleren Dehnungen der Versuchskörper in Abhängigkeit von der Temperatur auch die Dehnungen des Betons allein aufgetragen. Außerdem sind zusätzlich im Bild die nach Schneider [5.5] berechneten Gesamtkriechverformungen  $\epsilon_{\text{ges}}$  des Betons dargestellt, die sich mit den in [5.5] angegebenen  $\varphi$ -Werten und mit den in den Versuchskörpern vorhandenen Betondruckspannungen berechnen lassen. Hierzu wurde die Vorspannkraft näherungsweise als konstant, die Temperatur hingegen als instationär angenommen.

Aus der Darstellung wird deutlich, daß bereits die nicht vorgespannten Spanndrahteinlagen die Gesamtdehnungen ab rd. 500°C verringern. Wie den Bildern 5.34 und 5.35 zu entnehmen ist, nimmt ab 500°C der Schlupf merklich zu. Dieses Verhalten ist auf die unterschiedlichen thermischen Dehnungen von Spanndraht und Beton zurückzuführen.

In Bild 6.3 sind die freien Dehnungen des Betons sowie die Differenzdehnungen Beton/Draht und Beton/Litze dargestellt. Die Drähte der schlaff bewehrten Versuchskörper werden also durch die größere Dehnung des Betons ab rd 500°C "vorgespannt". Eine andere Darstellung der Dehnungen, die eine bessere Aussage über die Auswirkungen hoher Temperaturen auf das Dehnungsverhalten und die Veränderungen der Stabendverschiebungen erlaubt, ist in den Bildern 6.4 ff vorgenommen worden.

In Bild 6.4 sind für DO die Dehnungsdifferenzen von Beton/ Spanndraht, Beton/Versuchskörper (DO) und Versuchskörper (DO)/ Spanndraht in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Außerdem enthält das Bild den zugehörigen Schlupf sowie die Kriechdehnung, berechnet nach [5.5], hier jedoch mit den ver-

änderlichen Spannungen, die sich aus der Differenzdehnung zwischen Beton und Spannstahl ergeben.

Hieraus ist zu ersehen, daß die geringfügige größere Dehnung des Betons bis  $400^{\circ}\text{C}$  keine Auswirkungen auf das Dehnverhalten und den Schlupf des Versuchskörpers hat. Ab  $400^{\circ}\text{C}$  nehmen die Dehnungen des Betons stärker zu als die freien Stahldehnungen. Bis  $470^{\circ}\text{C}$  dehnt sich der Versuchskörper nahezu unbehindert. Die unterschiedlichen thermischen Dehnungen der Baustoffe führen jedoch zu einem Spannungsaufbau und somit in den Endbereichen des Versuchskörpers zu einer Verbundbeanspruchung. Mit der Eintragung dieser Spannung verbunden sind Stabendverschiebungen. Ab  $500^{\circ}\text{C}$  nehmen die Betondehnungen viel stärker zu als die Stahldehnungen. Der hiermit verbundene Spannungsaufbau geht mit einer inneren Dehnungsbehinderung des Versuchskörpers einher, dargestellt als Dehnungsdifferenz Beton/Versuchskörper. Wie Bild 5.30 zu entnehmen ist, setzt sich diese Dehnungsdifferenz aus einem irreversiblen Anteil (Kriechanteil) und einem reversiblen, thermisch abhängigen Verformungsanteil zusammen.

Mit dem ab  $500^{\circ}\text{C}$  einsetzenden Betonkriechen sind starke Stabendverschiebungen verbunden. Diese resultieren sowohl aus dem Eintragungsproblem, wie oben beschrieben, als auch aus den zusätzlich auftretenden Stabendverschiebungen aus Verbundkriechen. Außerdem dürfte der Schlupfanteil noch erhöht werden durch die sich aus der geringeren 'Vorspannung' der Randbereiche ergebende größere Betondehnung und der damit verbundenen Dehnungsunterschiede.

Ab  $650^{\circ}\text{C}$  dehnen sich Versuchskörper und Beton gleich. Das heißt, daß der behindernde Einfluß der Drahteinlagen verschwindet. Dies läßt den Schluß zu, daß einerseits - aufgrund des Absinkens der E-Moduli der Baustoffe - keine weiteren Spannungssteigerungen im Spannstahl mehr möglich sind, andererseits auch über Verbund nicht mehr einleitbar wären.

Berechnet man nach [5.5] die Kriechverformungen mit Hilfe der veränderlichen Spannungen, die sich aus dem Dehnungsunterschied zwischen Stahl und Beton ergeben, so erhält man gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten bis  $600^{\circ}\text{C}$ .

In Bild 6.5 sind die Dehnungsdifferenzen der gering vorgespannten Versuchskörper DI dargestellt sowie die gerechneten Kriechdehnungen  $\epsilon_{\text{IK}}$  nach [5.5]. Hieraus ist zu ersehen, daß schon ab rd  $185^{\circ}\text{C}$  aufgrund der Vorspannung und der Spannungssteigerung aus unterschiedlichem Dehnverhalten zwischen Versuchkörper und Spannstahl geringere Dehnungen auftreten als beim Beton allein. Bis  $280^{\circ}\text{C}$  wird die Vorspannung noch durch eine geringe Spannungssteigerung aus unterschiedlicher thermischer Dehnung erhöht, die Kriechdehnungen nehmen kontinuierlich zu. Damit verbunden ist eine kontinuierliche Stabendverschiebungszunahme aus Verbundkriechen, wie sie auch für Spanndraht aus den Verbunduntersuchungen (Bild 5.10) her bekannt ist.

Zwischen  $280^{\circ}\text{C}$  und  $415^{\circ}\text{C}$  ist keine Spannungssteigerung aus unterschiedlicher thermischer Dehnung vorhanden. Betonkriechen und Stabendverschiebungen (aufgrund von Verbundkriechen) nehmen kontinuierlich zu.

Der erneute Anstieg des Dehnungsunterschiedes zwischen Beton und Stahl hat auf das Kriechen nur einen geringen Einfluß. Die Hauptauswirkung ist in dem starken Anstieg der Stabendverschiebungen zu sehen, denn hier handelt es sich bis rd  $490^{\circ}\text{C}$  um ein reines Einleitungsproblem. Erst über  $490^{\circ}\text{C}$  wird der Spannstahl im Versuchskörper insgesamt wieder gedehnt. Dies wirkt sich in einer größeren Dehnungsbehinderung im Versuchskörper und in einem Anstieg der Stabendverschiebungen aus. Bei rd  $500^{\circ}\text{C}$  ist der Schlupf so stark, daß die Summe der Dehnungen - aus gemessener Spanndrahtdehnung und der Schlupfdehnung zusammen -, die sich aus der Umlage des Schlupfes auf die Balkenlänge berechnen läßt, genau so groß ist, wie die Dehnung des Versuchskörpers selbst.

Daraus kann man ableiten, daß die Eintragungslänge auf die halbe Versuchskörperlänge angewachsen ist. Das heißt, daß über Verbundwirkung keine weitere Spannungssteigerung mehr möglich ist; aus den Verbundkriechuntersuchungen ist jedoch bekannt (Bild 5.10), daß in diesem Zustand die vorhandene Last noch über Reibung gehalten werden kann. Ab  $525^{\circ}\text{C}$  nimmt der Unterschied der Dehnungen des Versuchskörpers und des Stahles konstant zu. Da über Verbund jedoch keine weitere Spannungssteigerung mehr möglich ist, nimmt auch der Schlupf ständig zu. Die vorhandene Stahlspannung reicht jedoch aus, die Betondehnungen zu behindern, d.h. die Kriechdehnungen zu erhöhen. Ab  $650^{\circ}\text{C}$  ist keine Dehnungszunahme des Versuchskörpers mehr vorhanden. Eine Dehnungszunahme des Spannstahls führt zur Schlupfverniedrigung, d.h. daß nahezu keine Verbundwirkung in den Randbereichen mehr vorhanden ist.

In Bild 6.6 sind die aus den DMS-Messungen errechneten Spannstahlspannungen aufgetragen. Auch hier ist der Spannungsanstieg bis rd  $280^{\circ}\text{C}$  deutlich wiedergegeben. Mit Zunahme der Stabendverschiebungen ab  $400^{\circ}\text{C}$  sinkt die Stahlspannung deutlich ab.

Setzt man zur überschlägigen Bestimmung der Veränderung der Eintragungslängen voraus, daß es einen Mittelbereich mit konstanter Spannung gibt und je einen Randbereich mit linear ansteigender Spannung, so kann der Schnittpunkt dieser beiden Geraden als Anhalt für die Veränderung der Eintragungslängen genommen werden. Projiziert man nun diese Schnittpunkte auf die Grundfläche, so erhält man die Veränderung der Eintragungslänge in Abhängigkeit von der Temperatur. Aus Bild 6.6 (DI) ist zu ersehen, daß die Eintragungslänge bis  $400^{\circ}\text{C}$  nahezu konstant bleibt, darüber aber stark zunimmt. Verlängert man diese Linie gleichsinnig, so erhält man einen Schnittpunkt mit der Temperaturachse bei rd  $500^{\circ}\text{C}$ . Ab hier ist die Eintragungslänge etwa gleich der halben Versuchskörperlänge.

Die hochvorgespannten Versuchskörper DIII zeigen, wie in Bild 6.7 dargestellt, bis  $400^{\circ}\text{C}$  nahezu das gleiche Verhalten wie DI. Jedoch kann die zusätzliche Spannungssteigerung aus der größeren Dehnung der Versuchskörper gegenüber dem Spanndraht aufgrund der hohen schon vorhandenen Vorspannung über Verbund nicht aufgenommen werden. Dies führt schon ab rd  $100^{\circ}\text{C}$  zu einer merklichen Schlupfzunahme. Von  $180^{\circ}\text{C}$  bis  $400^{\circ}\text{C}$  steigen die Kriechdehnungen kontinuierlich an, jedoch in einem stärkeren Maße als bei DI, so daß bei DIII eine größere Entspannung als bei DI auftreten kann.

Zwischen  $400^{\circ}\text{C}$  und  $550^{\circ}\text{C}$  nehmen die Betondehnungen wieder stärker zu als die Stahldehnungen. Dies führt nicht nur zu Spannungssteigerungen sondern auch zu einer Zunahme des Schlupfes und des Kriechens im Mittelbereich. Ab  $550^{\circ}\text{C}$  wird die zusätzliche "Vorspannung" so hoch, daß es zu einem Verbundversagen kommt. Der Stahl rutscht in den Versuchskörper, dieser entspannt sich stark und die Dehnungen des Versuchskörpers nehmen sehr schnell zu.

In Bild 6.8 sind die Differenzen der mittleren Stabendverschiebungen der vorgespannten Versuchskörper mit den O-Körpern dargestellt. Hierdurch wird der Einfluß auf die Stabendverschiebung deutlich, der sich allein aus der Vorspannung ergibt. Für DIII ist ab  $550^{\circ}\text{C}$  eine starke Schlupfzunahme zu sehen. Dies bestätigt die Annahme des Verbundversagens.

Betrachtet man die in Bild 6.9 dargestellten Spannstahlspannungen über die Balkenlänge und Temperatur, so kann das oben beschriebene Verhalten bestätigt werden. Bis  $400^{\circ}\text{C}$  (in Feldmitte ab  $180^{\circ}\text{C}$ ) fällt die Vorspannung ab, um dann wieder anzusteigen. Ermittelt man die Eintragungslänge wie bei DI, so ist zu erkennen, daß sie bis  $400^{\circ}\text{C}$  stetig zunimmt und über  $400^{\circ}\text{C}$  nahezu konstant bleibt. Bis  $500^{\circ}\text{C}$  ist die Eintragungslänge auf etwa den doppelten Wert bei RT angewachsen.

Baut sich jedoch in den Randbereichen die Vorspannung ab und vergrößert sich der Eintragungsbereich, so müßten hier auch größere Dehnungen als im mittleren Bereich zu erkennen sein. Die Bilder 5.18 - 5.20 zeigen die Betondehnungen über die Versuchskörperlänge. Während beim DIII-O-Körper bis rd  $600^{\circ}\text{C}$  kein deutlicher Dehnungsunterschied zwischen Rand- und Mittelbereich zu erkennen ist, geht aus den Bildern 5.19 und 5.20 hervor, daß die Randbereiche sich tatsächlich stärker dehnen.

Das gewählte optische Meßverfahren ist aber aufgrund der großen Meßbasis von 200 mm zu grob, um eine genauere Bestimmung der Veränderung der Eintragungslänge vornehmen zu können. Es ist jedoch zu erkennen, daß die Randbereiche, definiert durch eine stärkere Dehnungszunahme, sich um rd eine Basislänge von 200mm vergrößern. (Bei den DI-Körpern dehnen sich die Randbereiche zwar auch stärker, jedoch ist hier bis rd  $500^{\circ}\text{C}$  eine deutliche Randbereichsvergrößerung nicht zu erkennen.)

## 6.2 Verhalten der mit Litzen vorgespannten Versuchskörper

Bild 6.2 gibt die Gesamtdehnungen der L-Körper sowie die gemäß |5.5| gerechneten Kriechverformungen wieder. In Bild 6.10 sind die Dehnungsdifferenzen von Beton/Litze, Beton/Versuchskörper und Versuchskörper/Litze sowie der Schlupf für den nicht vorgespannten Versuchskörper dargestellt. Im Unterschied zum Spanndraht dehnt sich die Litze bis  $200^{\circ}\text{C}$  stärker als Beton, ab  $200^{\circ}\text{C}$  dehnt sich der Beton stärker.

Bis  $400^{\circ}\text{C}$  kommt es aufgrund dieser unterschiedlichen Dehnungen zu einem Spannungsaufbau und damit verbunden zu Kriechverkürzungen. Jedoch tritt erst über  $400^{\circ}\text{C}$  ein deutlicher Schlupf auf, der durch die Spannungssteigerung verursacht wird. Das weitere Ansteigen der Dehnungsdifferenz zwischen Beton/Litze führt zu einem stärkeren Kriechen und zur Zunahme der Stabendverschie-



bungen. Ab  $600^{\circ}\text{C}$  ist kein Einfluß aus der Dehnungsbehinderung durch die Litze mehr zu erkennen. Aufgrund des weiteren Anstiegs der Versuchskörperdehnungen muß vermutet werden, daß keine Verbundwirkung mehr vorhanden ist.

In Bild 6.11 sind die Ergebnisse der gering vorgespannten L-Körper dargestellt. Hier ist der Kriecheinfluß der Vorspannung deutlich zu erkennen. Es werden nahezu die nach [5.5] mit konstanter Last berechneten Kriechdehnungen erreicht. Daraus ist abzuleiten, daß der Vorspannungsverlust aus Kriechen und Stabendverschiebung durch die zusätzliche Spannungssteigerung aus unterschiedlicher Dehnung zwischen Beton und Stahl wieder ausgeglichen wird. Verbunden damit ist auch gleichzeitig eine Zunahme des Schlupfes.

Erst ab  $540^{\circ}\text{C}$  werden die kriechezeugenden Spannungen durch die größer werdenden Dehnungen des Versuchskörpers gegenüber dem Stahl erhöht. Der Verbund wird jetzt jedoch schon nahezu auf der ganzen Versuchskörperlänge beansprucht. Ab  $560^{\circ}\text{C}$  entspricht die Eintragungslänge etwa der halben Versuchskörperlänge; über Verbund ist keine Spannungssteigerung mehr möglich. Ab  $650^{\circ}\text{C}$  gleichen sich die Dehnungen der Versuchskörper denen der vorgespannten an. Bei  $700^{\circ}\text{C}$  ist die Vorspannung ganz abgebaut, der Schlupf ändert sich nicht mehr.

In Bild 6.12 sind die Dehnungsdifferenzen und der Schlupf der hochvorgespannten L-Körper dargestellt. Aufgrund der hohen Vorspannung nehmen die Kriechdehnungen und das Verbundkriechen mit steigender Temperatur stark zu. Gerechnete und gemessene Kriechdehnungen sind fast gleich. Der zusätzliche Spannungsanstieg aus der unterschiedlichen Dehnung zwischen Beton und Litze führt zu einer Erhöhung der Vorspannung. Diese Erhöhung bewirkt im Einleitungsbereich eine Zunahme der Betonzugspan-

nungen. Diese Zugspannungen addieren sich zu den bereits vorhandenen Zugspannungen aus den Spaltzugkräften aus Einleitung von Einzelkräften sowie zu den aus der thermischen Gradienten auftretenden Betonzugspannungen. Die Häufung der Zugspannungen führt zum schlagartigen Versagen durch Aufreißen entlang der Mittellinie. (Beide Versuchskörper versagten gleichartig bei gleicher Temperatur.)

In Bild 6.13 sind die Ergebnisse des Versuchskörpers DIII/3 dargestellt. Im Gegensatz zu den anderen Versuchskörpern dieser Serie wurde DIII/3 mit einer höheren Aufheizgeschwindigkeit gefahren. DIII/3 versagte explosionsartig bei rd. 340 °C. Offensichtlich wurden durch die schnellere Aufheizung und der damit verbundenen größeren Temperaturgradienten im Inneren Zugspannungen erzeugt, die, überlagert mit den Ringzugspannungen aus Lasteinleitung im Randbereich, zum Überschreiten der Zugfestigkeit und zum Aufreißen des Betons entlang der Spanndrähte führten. Der Lasteintragsbereich verlagerte sich fortlaufend schlagartig nach innen, bis der gesamte Versuchskörper zerstört ist.

### 6.3 Zusammenfassung

Abschließend muß noch erwähnt werden, daß bei der Beschreibung der Spannungsverhältnisse in den Versuchskörpern die Spannstahlrelaxation unter hohen Temperaturen unberücksichtigt bleiben mußte, da hierüber nur wenig Kenntnisse vorliegen. Spannstahlrelaxation wird aufgrund der nahezu gleichen Ausdehnungskoeffizienten von Beton und Spannstahl bis 400 °C auftreten. Dies ist jedoch der Bereich, in dem anhand der DMS-Messungen Aussagen über den Spannungsverlauf und die Veränderung der Eintragungslänge gewonnen wurden. Setzt man jedoch die Relaxation für alle drei Meßstellen aufgrund der annähernd gleichen Spannung als nahezu gleich an, so würde die Spannung zwar reduziert, die Eintragungslängen würden aber davon i.w. unbeeinflusst bleiben.

Somit kann aufgrund der Untersuchungen festgestellt werden, daß sich die Eintragungslängen mit steigender Temperatur vergrößern. Es gibt eine kritische Temperatur, ab der ein horizontales Niveau der Spannstahlspannung nicht mehr vorhanden ist. Ab hier ist eine Eintragungslänge erreicht, die gleich der halben Versuchskörperlänge ist. Eine weitere Zunahme der Spannstahlspannung ist dann ausgeschlossen. Bei den geringer vorgespannten DI-Körpern ist diese kritische Temperatur bei rd  $500^{\circ}\text{C}$  erreicht; bei den DIII-Körpern bei rd  $575^{\circ}\text{C}$  und den LI-Körpern bei rd  $560^{\circ}\text{C}$ .

Die hochvorgespannten Versuchskörper neigen zum schlagartigen Versagen. Während bei den L-Körpern das Versagen durch Bügel verhindert werden könnte, scheint bei den hochvorgespannten D-Körpern mit höherer Aufheizgeschwindigkeit eine Verbügelung das Aufreißen des Körpers nicht verhindern zu können, da die zur Zerstörung führenden Ringzugkräfte die Betondeckung entlang der Spanndrähte aufreißen.

## 7. LITERATURVERZEICHNIS

- | 2.1 | Kordina, K.: Das Verhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Feuerangriff. DAfStb, Heft 162, 1964
- | 2.2 | Deutschmann, H.: Brandprüfungen an vorgespannten Betonbauteilen (Bericht der Niederländischen Betonvereinigung). DAfStb, Heft 162, 1964
- | 2.3 | Boon, J. und Monnier, Th.: Fire resistance of prestressed concrete beams. Heron, Vol.21, 1976, Nr. 1
- | 3.1 | Richtlinien für die Prüfung von Spannstählen auf ihre Eignung zur Verankerung durch sofortigen Verbund. Stand Juni 1980, Mitteilungen IfBt, 6/1980
- | 3.2 | DIN 4102, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen, Ausgabe 1981
- | 3.3 | Kordina, K. und Meyer-Ottens, C.: Beton-Brandschutz-Handbuch. Beton-Verlag, 1981
- | 3.4 | RILEM/FIP/CEB: Recommendations - Specification for the test to determine the bond properties of prestressing tendons. June 1979. Materials and Structures, Vol.12, No. 68 (1979)
- | 3.5 | FIP-Committee, June 1981. Prestressing steels and systems, Ad-hoc-committee: Test for the determination of the transmission length.
- | 3.6 | Martin, H.: Zusammenhang zwischen Oberflächenbeschaffenheit, Verbund und Sprengwirkung von Bewehrungsstählen unter Kurzzeitbelastung. DAfStb, Heft 228, 1973
- | 3.7 | Ruge, J. und Winkelmann, O.: Verformungsverhalten von Bau-, Beton- und Spannstählen bei hohen Temperaturen. Arbeitsbericht 1978-80, Teil II. Sonderforschungsbereich 143 'Brandverhalten von Bauteilen'

- [ 3.8 ] Richter, E. und Sager, H.: Erprobung von Hochtemperatur-Dehnmeßstreifen. Arbeitsbericht 1978-80, Teil I, Sonderforschungsbereich 148, 'Brandverhalten von Bauteilen'
- [ 3.9 ] Birkenmaier, M.: Verbundprobleme bei Spannbett-Vorspannung. Schweizerische Bauzeitung, 95. Jg., Heft 26, Juni 1977
- [ 4.1 ] Rehm, G.: Über die Grundlagen des Verbundes zwischen Stahl und Beton. DAfStb, Heft 138, 1961
- [ 5.1 ] Cahill, C.: The Behaviour of Prestressing Wire at Elevated Temperature. 'Fire resistance of prestressed concrete' Symposium, Braunschweig, 1965
- [ 5.2 ] Pfützenreuter, A.: Kriechen und Spannungsrelaxation kaltverformter Stahldrähte mit unterschiedlicher Vorbehandlung. Stahl und Eisen, Nr. 20, 1960
- [ 5.3 ] Kubik, F.: Relaxationsversuche an Spannbettldrähten bei erhöhten Temperaturen. FIP-Kongreß New York, 1974
- [ 5.4 ] Bulletin d'information Nr. 145: Design of concrete structures for fire resistance. Preliminary draft of an Appendix to the CEB-FIP Model Code, 1982
- [ 5.5 ] Schneider, U.: Ein Beitrag zur Frage des Kriechens und der Relaxation von Beton unter hohen Temperaturen. Habilitationsschrift, Braunschweig, 1979
- [ 5.6 ] Schneider, U., Diederichs, U., Rosenberger, W., Weiß, R.: 'Hochtemperaturverhalten von Festbeton'; Arbeitsbericht 1978-80, Teil II, Sonderforschungsbereich 148, 'Brandverhalten von Bauteilen'

Verzeichnis der Bilder:

Bild 3.1: Versuchskörper, Anordnung der Meßinstrumente

Bild 3.2: Ausziehkorper

Bild 3.3: Spannseite des Spannbettes

Bild 3.4: Einzeldrahtvorspannung

Bild 3.5: Versuchsofen und Lage der Versuchskörper

Bild 3.6: Quarzglasdilatometer (Dehnungsmeßgerät)

Bild 3.7: Röhrenquarzglasdilatometer (Schlupfmeßgerät)

Bild 3.8: Optisches Dehnmeßgerät (ODM)

Bild 4.1: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DI/1 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.2: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DI/2 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.3: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DI/3 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.4: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DIII/1 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.5: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DIII/2 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.6: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DIII/3 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.7: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LI/1 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.8: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LI/2 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.9: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LII/1 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.10: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LII/2 in Abhängigkeit von der Zeit

Bild 4.11: Stabendverschiebungen der Drähte beim Übertragen der Vorspannung (elast. Dehnung des Stabüberstandes blieb unberücksichtigt, schraffierte Fläche)

Bild 4.12: Stabendverschiebungen der Litzen beim Übertragen der Vorspannung (elast. Dehnung des Stabüberstandes blieb unberücksichtigt, schraffierte Fläche)

Bild 4.13: Verbundgesetze für Spanndraht und Litze zum Zeitpunkt des Übertragens der Vorspannung

Bild 4.14: Stahlspannungs-, Verbundspannungs- und Stabendverschiebungsverlauf über die Übertragungslänge der Versuchskörper

Bild 4.15: Stahlspannungsverlauf bis zur Versuchskörpermitte von DI/2

Bild 4.16: Stahlspannungsverlauf bis zur Versuchskörpermitte von DIII/2

Bild 4.17: Zeitabhängige Dehnungen der D-Körper

Bild 4.18: Zeitabhängige Dehnungen der L-Körper

Bild 4.19: Zeitabhängige Stabendverschiebungen der Versuchskörper

Bild 4.20: Zeitabhängige Stahldehnungsänderungen von DI/2

Bild 4.21: Zeitabhängige Stahldehnungsänderungen von DIII/2

Bild 4.22: Zeitabhängige Veränderung der Eintragungslänge von DI/2

Bild 4.23: Zeitabhängige Veränderung der Eintragungslänge von DIII/2

Bild 5.1: Spannungs-Dehnungslinien für hohe Temperaturen von Spanndraht und Litze

Bild 5.2: Temperatur-Dehnungskurven für Spanndraht und Litze

Bild 5.3: Relaxationsverhalten von Spannstahl (aus der Literatur abgeschätzt)

Bild 5.4: Temperaturabhängige Veränderung der E-Moduli von Beton und Spannstahl

Bild 5.5: Temperaturabhängige Veränderung der Druckfestigkeit von Mörtel und dem verwendeten Beton B 55 mit quarzitischem Zuschlag

Bild 5.6: Temperaturabhängige instationäre Dehnungsänderungen unter konstanter Last nach Schneider [5.5]

Bild 5.7: Verbundgesetze für hohe Temperaturen von Spanndraht  $\varnothing 7,5$  mm (DI)

Bild 5.8: Verbundgesetze für hohe Temperaturen von Spanndraht  $\varnothing 7,5$  mm (DIII)

Bild 5.9: Verbundgesetze für hohe Temperaturen von Litze  $\varnothing 0,5$ " (12,5 mm)

Bild 5.10: Verbundkriechen unter linear ansteigenden Temperaturen für Litze und Spanndraht

Bild 5.11: Temperaturverteilung über den Querschnitt in Temperaturschritten von DI (Anordnung der Thermoelementgabel in Bild 3.1)

Bild 5.12: Temperaturverteilung über den Querschnitt in Temperaturschritten von DIII (Anordnung der Thermoelementgabel in Bild 3.1)

Bild 5.13: Temperaturverteilung den Querschnitt in Temperaturschritten von LI (Anordnung der Thermoelementgabel in Bild 3.1)

Bild 5.14: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/0

Bild 5.15: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/1

Bild 5.16: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/2

Bild 5.17: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/3

Bild 5.18: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/0

Bild 5.19: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/1

Bild 5.20: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/2

Bild 5.21: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/3

Bild 5.22: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von LI

Bild 5.23: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von LI/1



- Bild 5.24: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/2
- Bild 5.25: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DII/1
- Bild 5.26: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DII/2
- Bild 5.27: Mittlere temperaturabhängige Betondehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie von DI
- Bild 5.28: Mittlere temperaturabhängige Betondehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie von DIII
- Bild 5.29: Mittlere temperaturabhängige Betondehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie der L-Körper
- Bild 5.30: Thermische Dehnungen der Baustoffe Beton, Spannstahl und Litze sowie der nicht vorgespannten Versuchskörper
- Bild 5.31: Thermische Dehnungen der Versuchskörper - DI
- Bild 5.32: Thermische Dehnungen der Versuchskörper - DIII
- Bild 5.33: Thermische Dehnungen der Versuchskörper - L
- Bild 5.34: Mittlere temperaturabhängige Stabendverschiebungen der DI-Körper
- Bild 5.35: Mittlere temperaturabhängige Stabendverschiebungen der DIII-Körper
- Bild 5.36: Mittlere temperaturabhängige Stabendverschiebungen der L-Körper
- Bild 5.37: Temperaturabhängige Stahldehnungen von DI/2
- Bild 5.38: Temperaturabhängige Stahldehnungen von DIII/2
- Bild 5.39: Gesamtansicht des Versuchskörpers DO nach dem Versuch (oben). Detailansicht von der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)
- Bild 5.40: Gesamtansicht des Versuchskörpers DI/1 nach dem Versuch (oben). Detailansicht von der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)
- Bild 5.41: Gesamtansicht des Versuchskörpers DI/2 nach dem Versuch (oben). Detailansicht der Stirnfläche nach dem Versuch (unten)
- Bild 5.42: Gesamtansicht der Versuchskörper nach dem Versuch - DI/3 (oben) - DIII/2 (unten)
- Bild 5.43: Rißbild der Eintragungszone des nicht vorgespannten L-Körpers nach einer Temperaturbeanspruchung von 600°C (oben). Detailansicht von der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)

Bild 5.44: Rißbild der Eintragungszone des vorgespannten Versuchskörpers LI/1 nach einer Temperaturbeanspruchung von 900°C (oben). Detailansicht der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)

Bild 5.45: Rißbild der Eintragungszone des vorgespannten Versuchskörpers LI/2 nach einer Temperaturbeanspruchung von 600°C (oben). Detailansicht der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)

Bild 5.46: Die Versuchskörper LII/2 (oben) und LII/1 (unten) nach einer Temperaturbeanspruchung von rd 340°C.

Bild 5.47: Der Versuchskörper DIII/3 nach einer Temperaturbeanspruchung von rd 340°C im Versuchsofen

Bild 6.1: Thermische Dehnungen der Versuchskörper der D-Serie, thermische Dehnungen des Betons sowie die nach Schneider [5.5] berechnete instationäre Gesamtdehnung

Bild 6.2: Thermische Dehnungen der Versuchskörper der L-Serie, thermische Dehnungen des Betons sowie die nach Schneider [5.5] berechnete instationäre Gesamtdehnung

Bild 6.3: Differenzdehnung zwischen Beton-Litze, Beton-Spanndraht sowie die Dehnung des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur

Bild 6.4: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von D0 in Abhängigkeit von der Temperatur

Bild 6.5: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von DI in Abhängigkeit von der Temperatur

Bild 6.6: Temperaturabhängige Veränderung der Stahlspannungen, über die halbe Balkenlänge aufgetragen, sowie die sich daraus ergebende Änderung der Eintragungslänge für DI/2

Bild 6.7: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von DIII in Abhängigkeit von der Temperatur

Bild 6.8: Mittlere lastbedingte Stabendverschiebungen in Abhängigkeit von der Temperatur

Bild 6.9: Temperaturabhängige Veränderung der Stahlspannungen, über die halbe Balkenlänge aufgetragen, sowie die sich daraus ergebende Änderung der Eintragungslänge für DIII/2

Bild 6.10: Differenzdehnungen Beton-Litze, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Litze sowie die Stabendverschiebungen von L0 in Abhängigkeit von der Temperatur

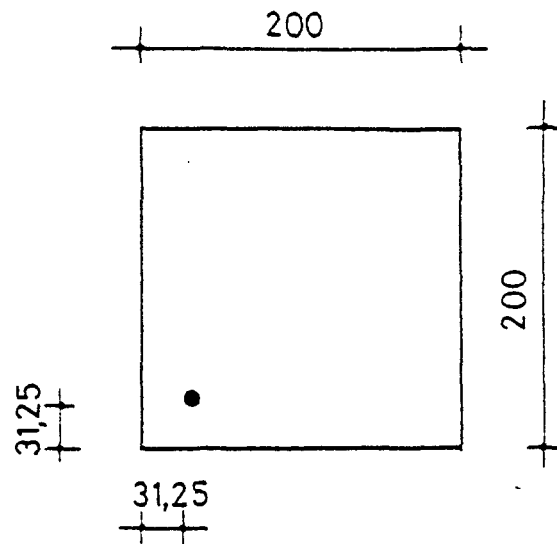
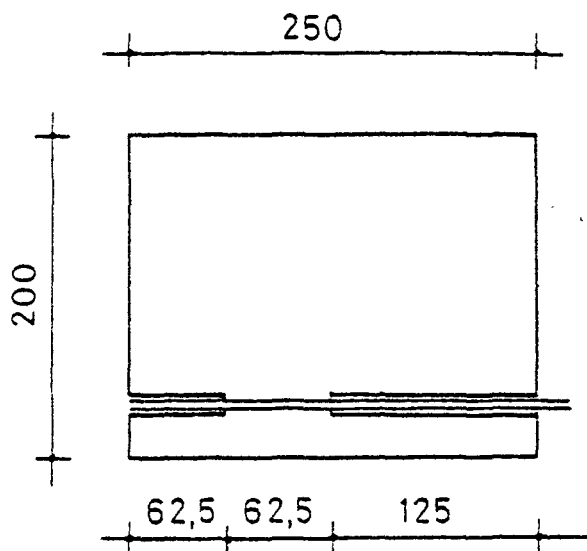
Bild 6.11: Differenzdehnungen Beton-Litze, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Litze sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von LI in Abhängigkeit von der Temperatur

Bild 6.12: Differenzdehnungen Beton-Litze, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Litze sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von LII in Abhängigkeit von der Temperatur

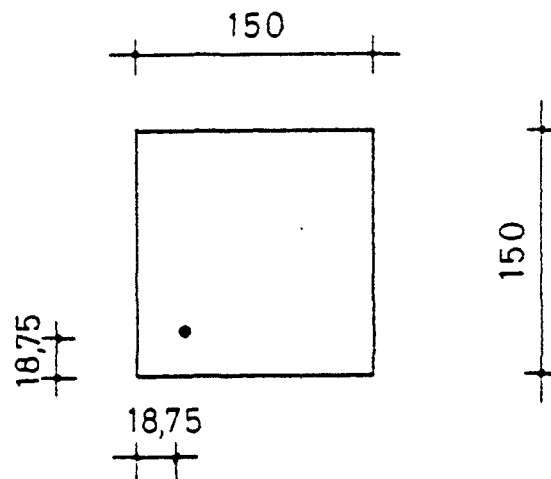
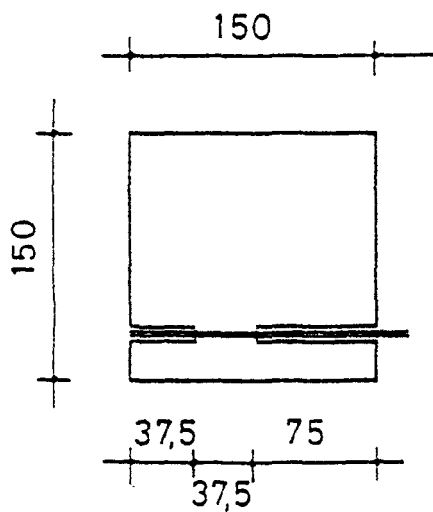
Bild 6.13: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von LIII in Abhängigkeit von der Temperatur



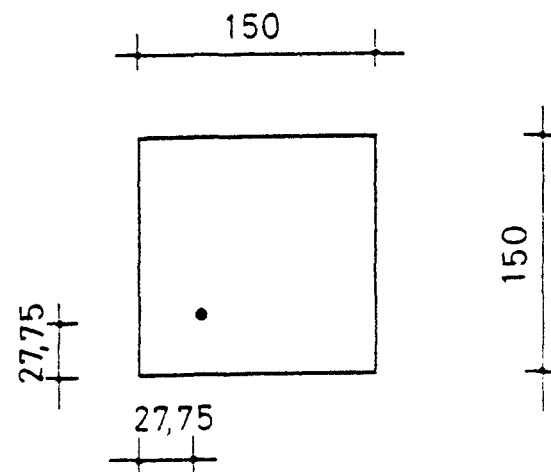
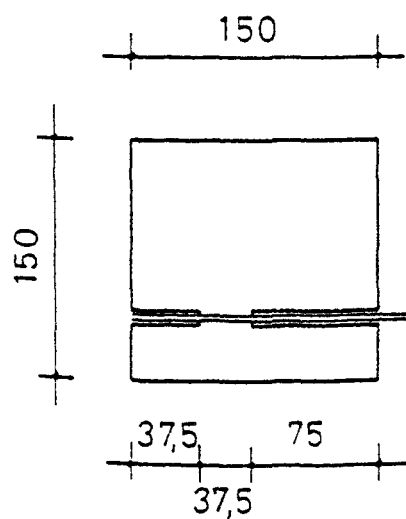
# Litze



## Draht D I



## Draht D III



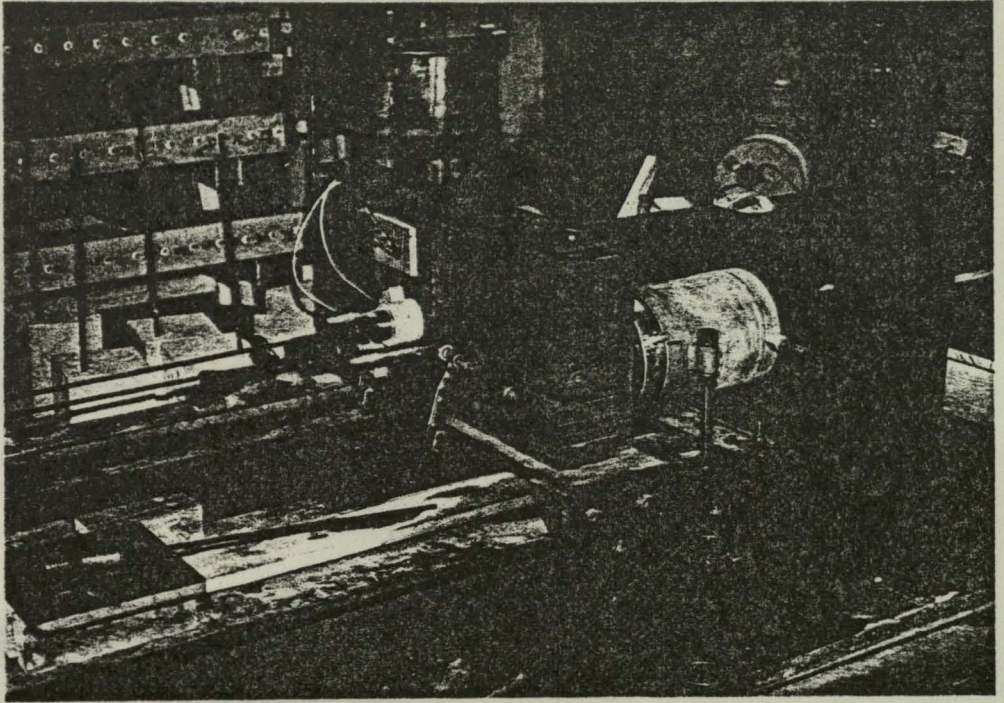


Bild 3.3: Spannseite des Spannbettes

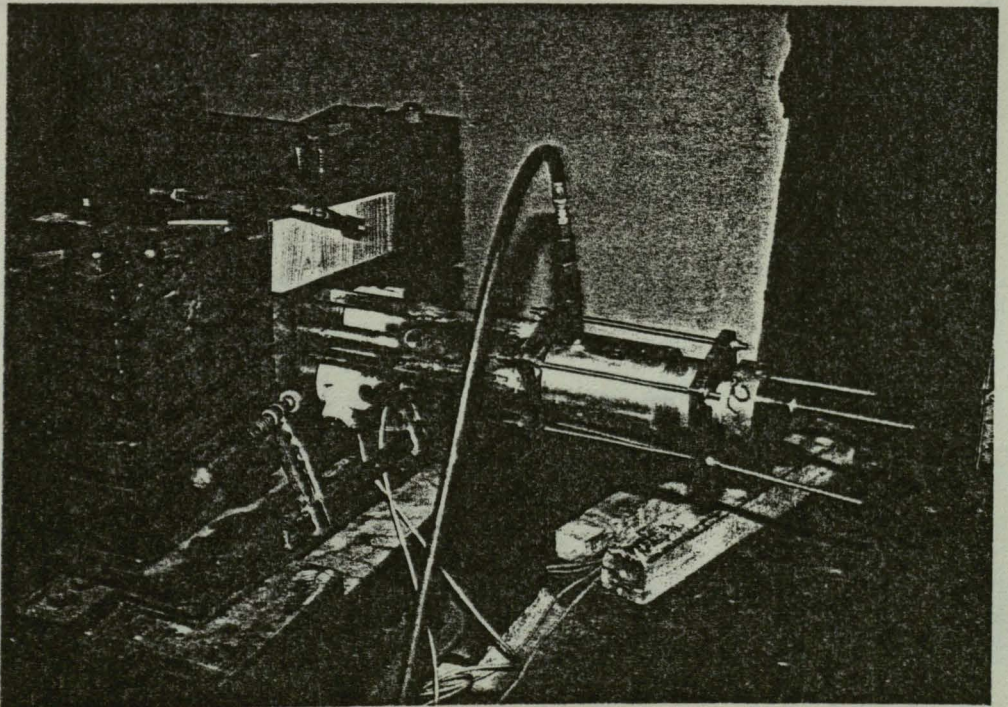


Bild 3.4: Einzeldrahtvorspannung



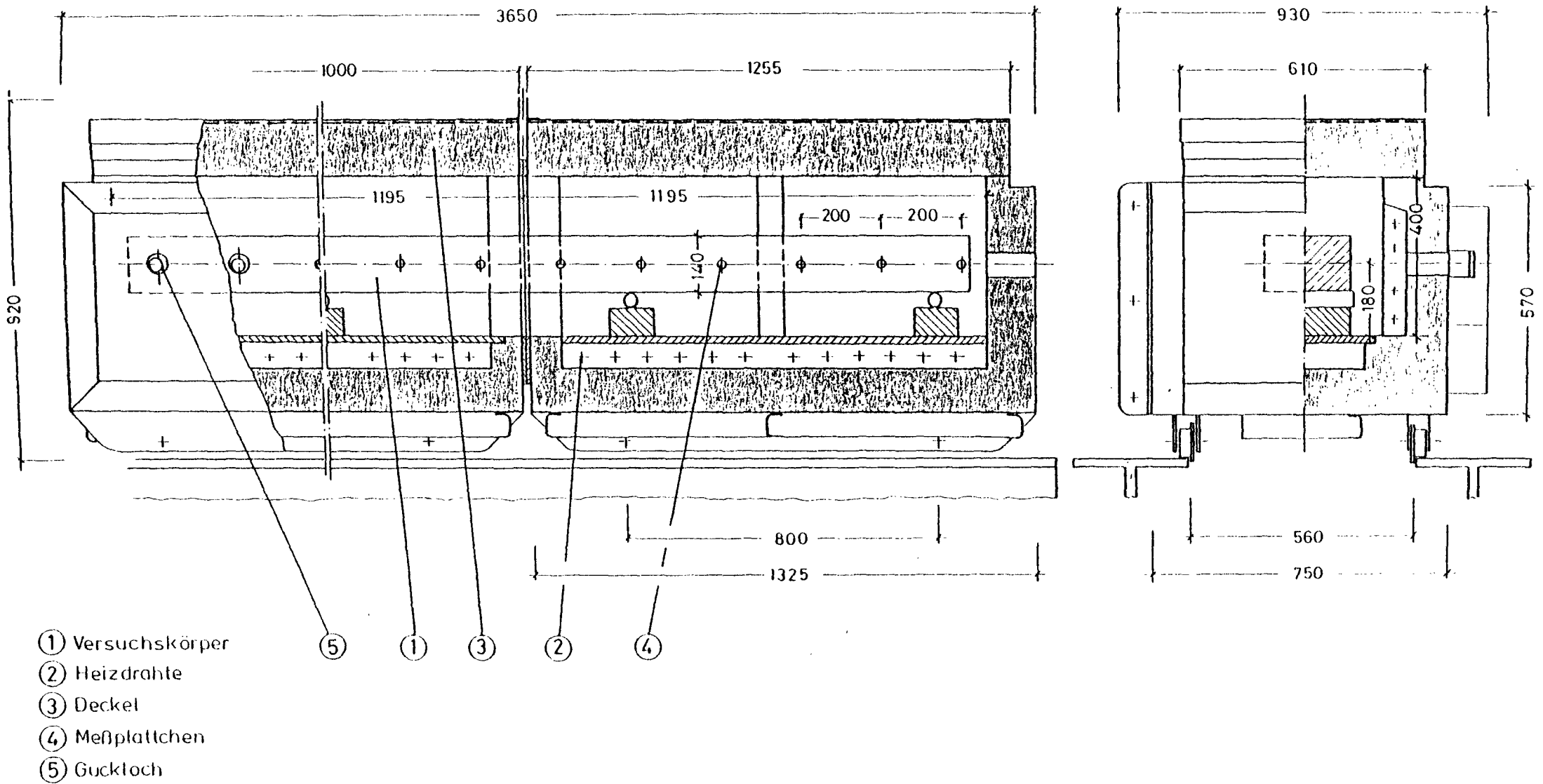
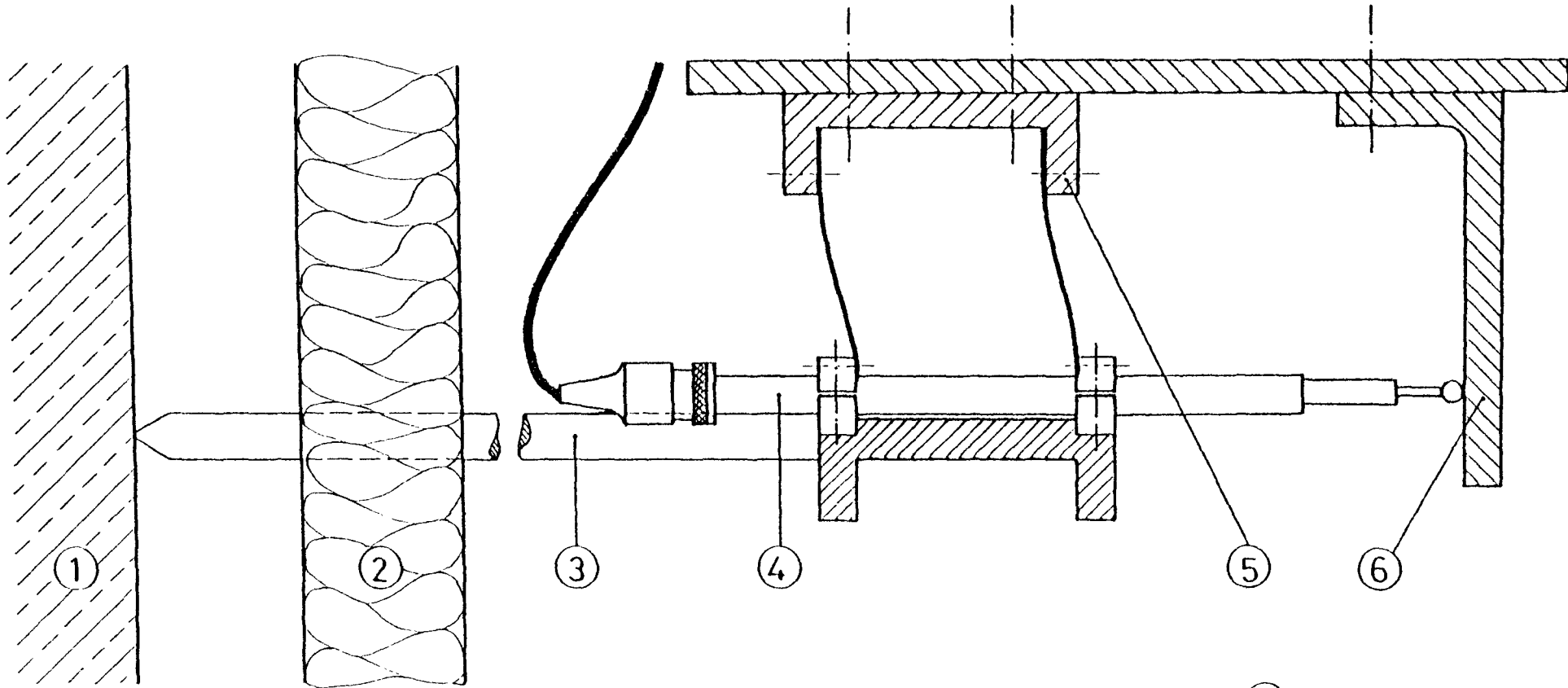
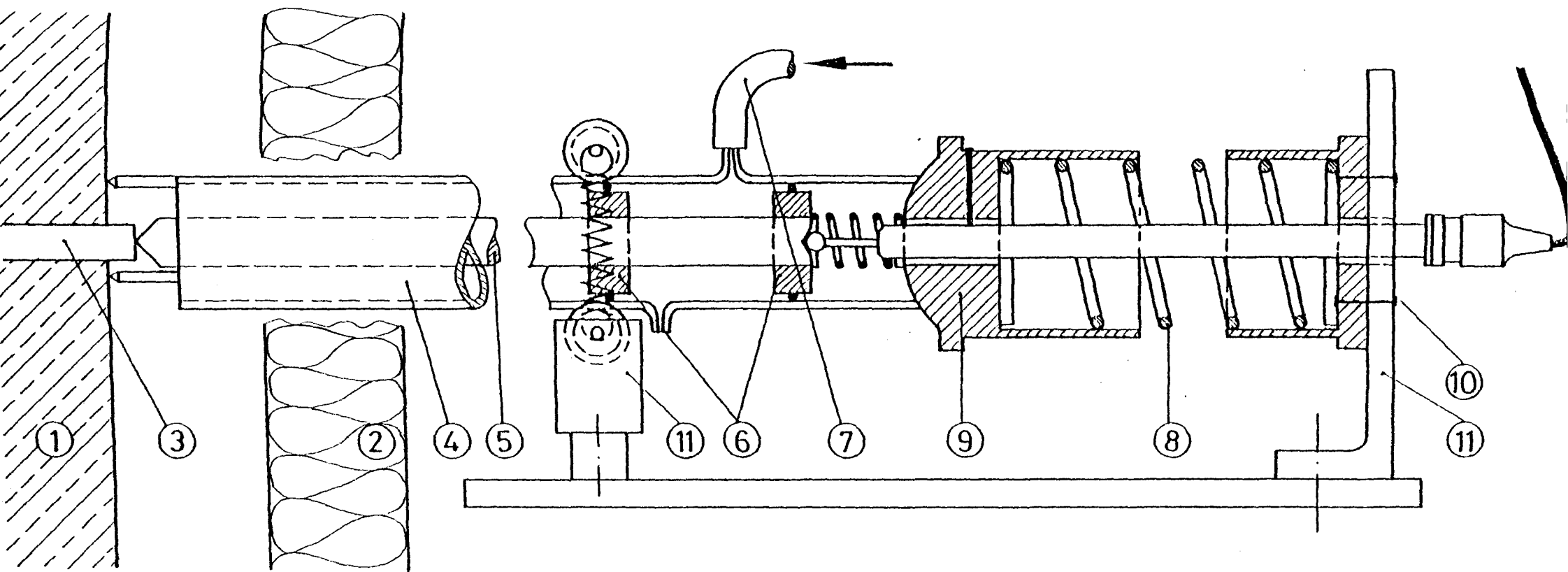


Bild 3.5: Versuchsofen und Lage der Versuchskörper



- ① Versuchskörper
- ② Ofen
- ③ Quarzglasstab
- ④ Wegaufnehmer
- ⑤ Parallelanker
- ⑥ Widerlager

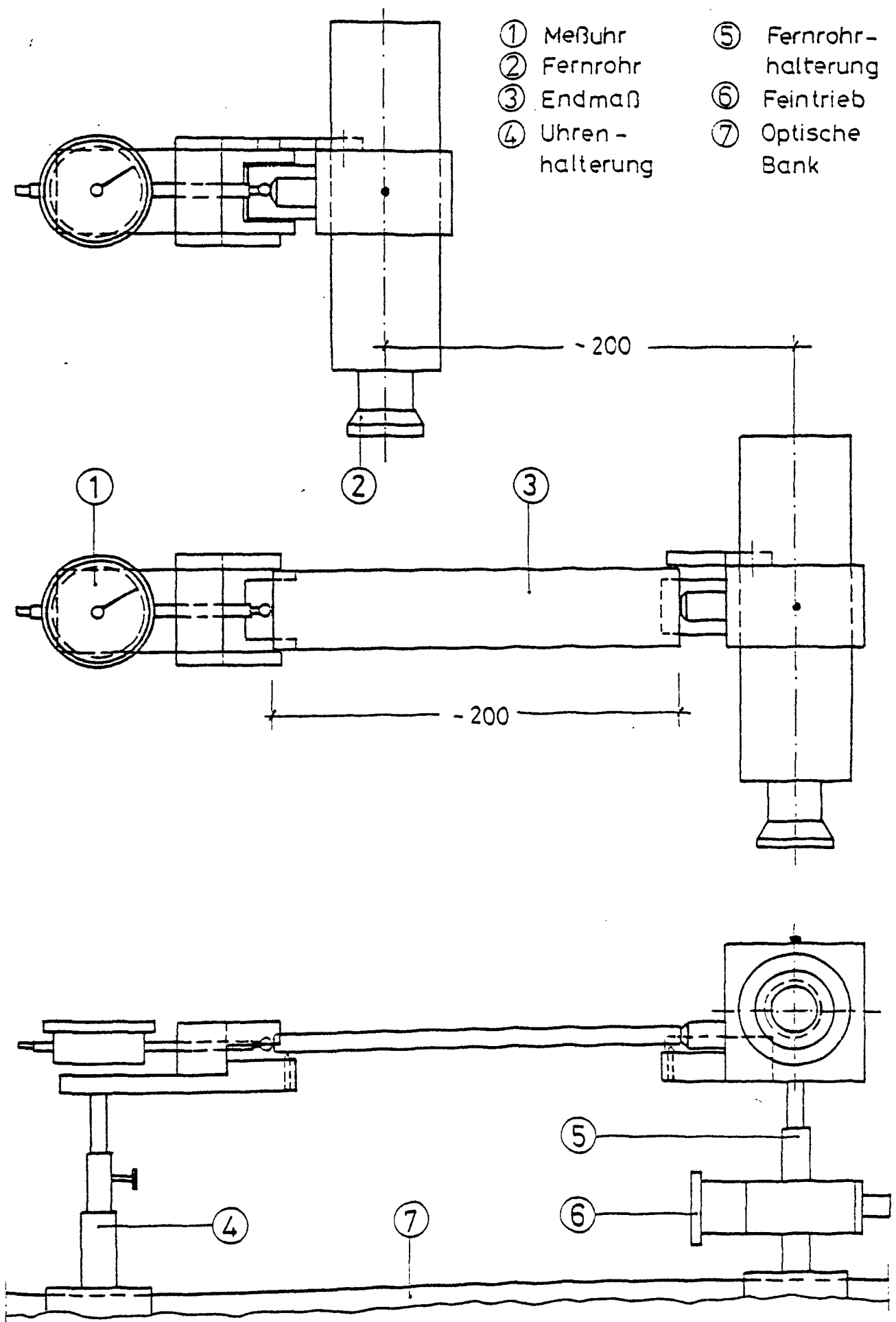
Bild 3.6: Quarzglasdilatometer (Dehnungsmeßgerät)



- |                  |  |
|------------------|--|
| ① Versuchskörper | ⑦ Kühlung                                |
| ② Ofen           | ⑧ Federpaket                             |
| ③ Spannstahl     | ⑨ Feder u. Wegauf-<br>nehmer - Halterung |
| ④ Quarzrohre     | ⑩ Wegaufnehmer                           |
| ⑤ Quarzstab      | ⑪ Widerlager                             |
| ⑥ Quarzringe     |  |

Bild 3.7: Röhrenquarzglasdilatometer (Schlupfmeßgerät)





**Bild 3.8:** Optisches Dehnmeßgerät (ODM)

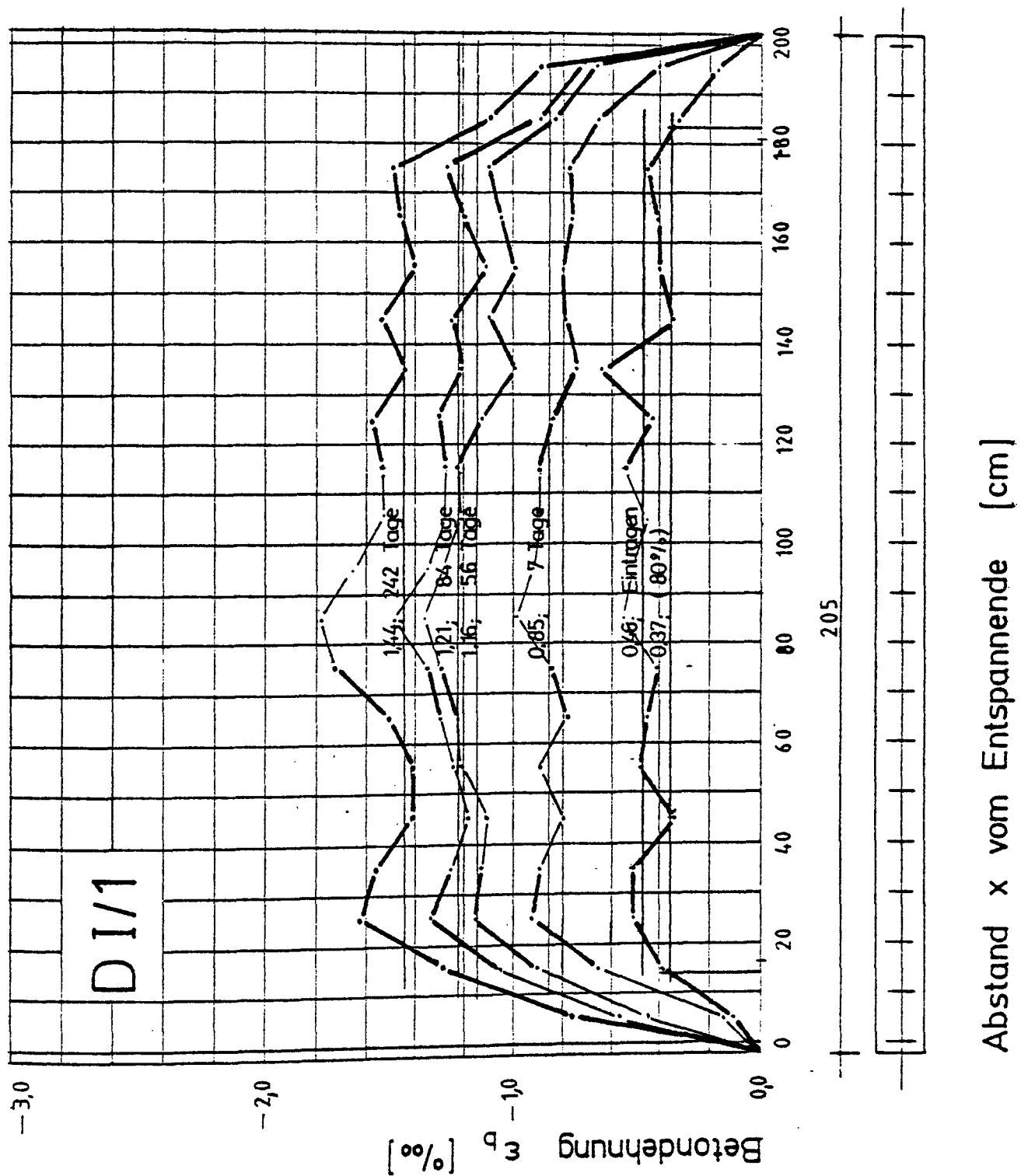
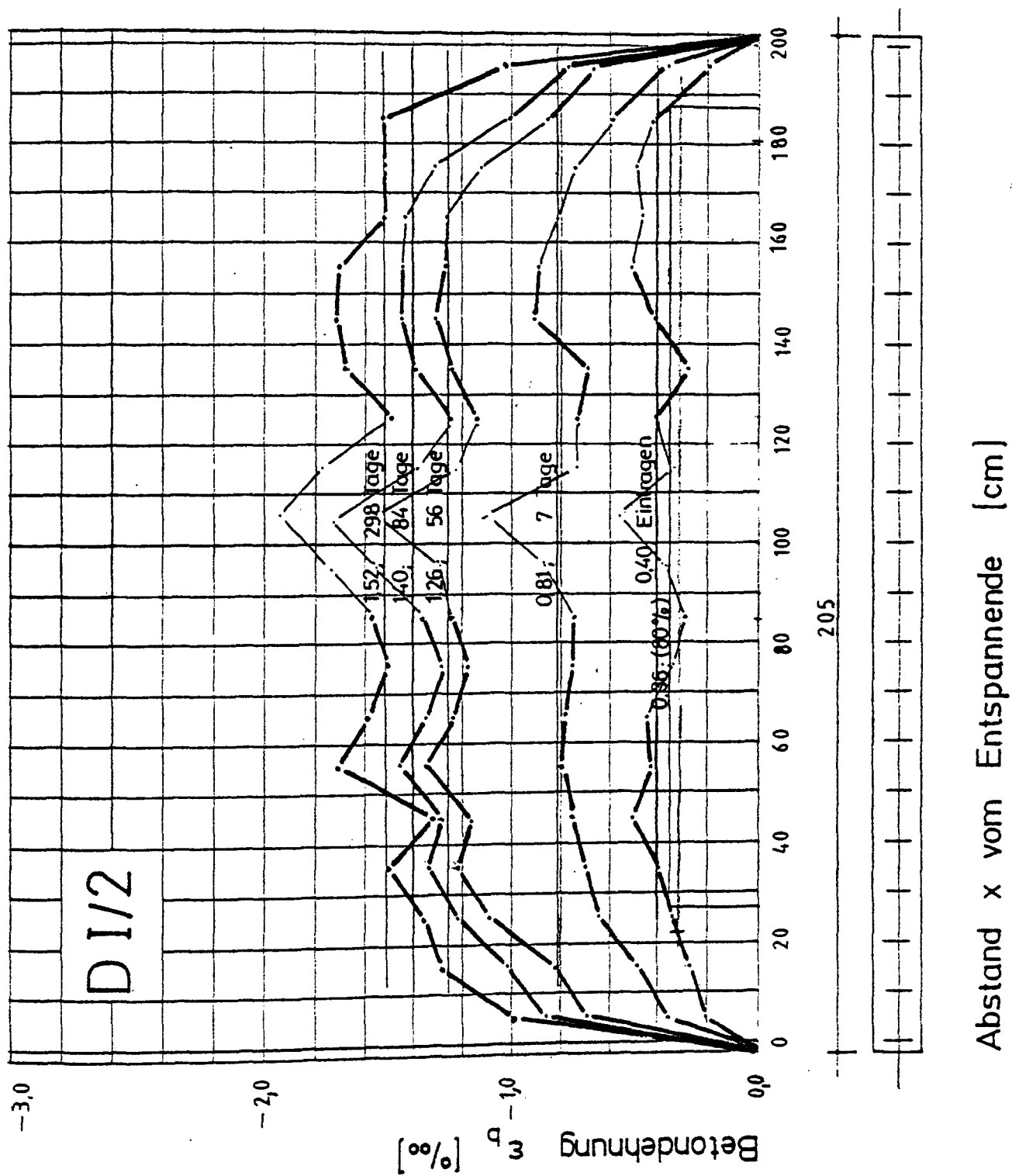
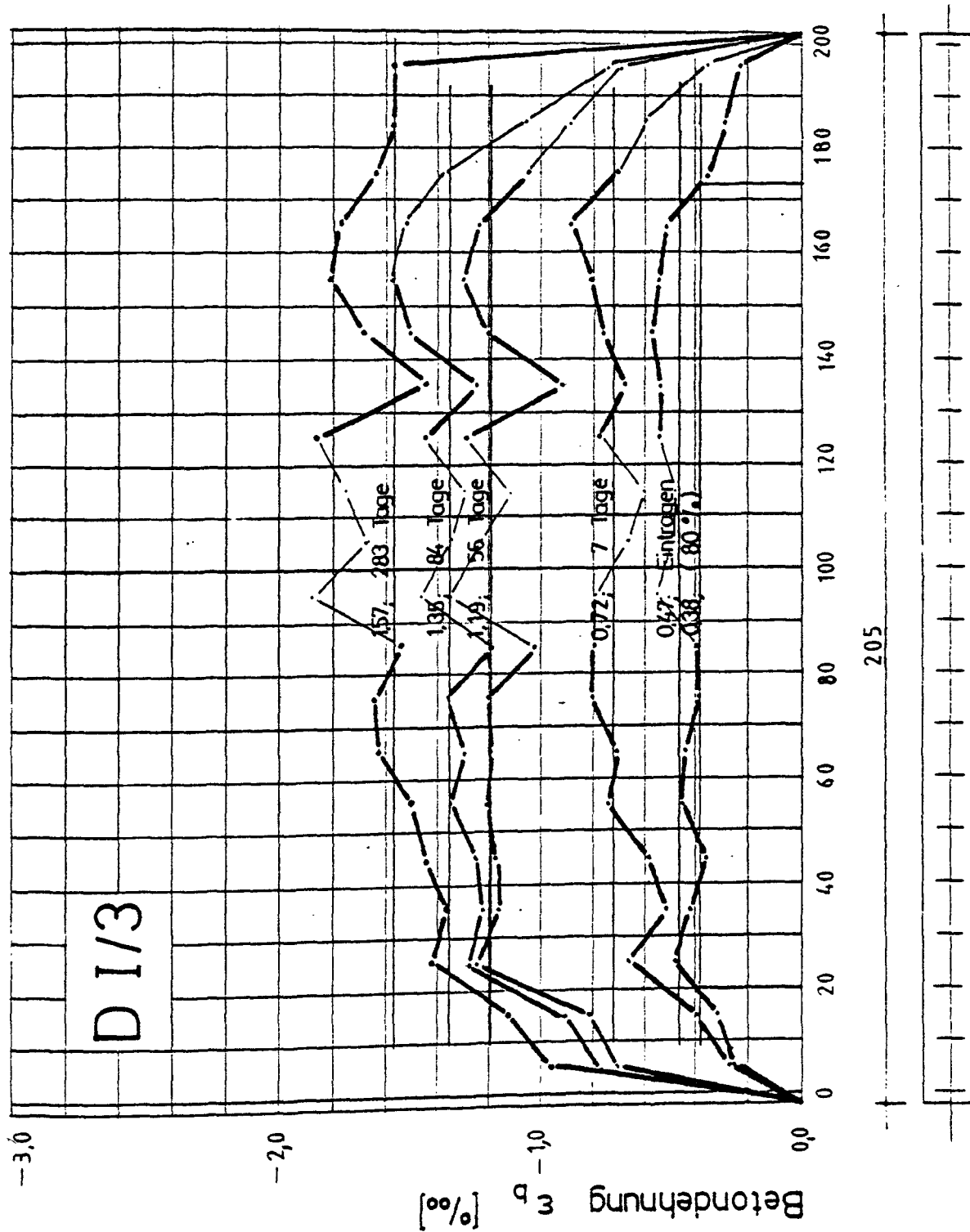


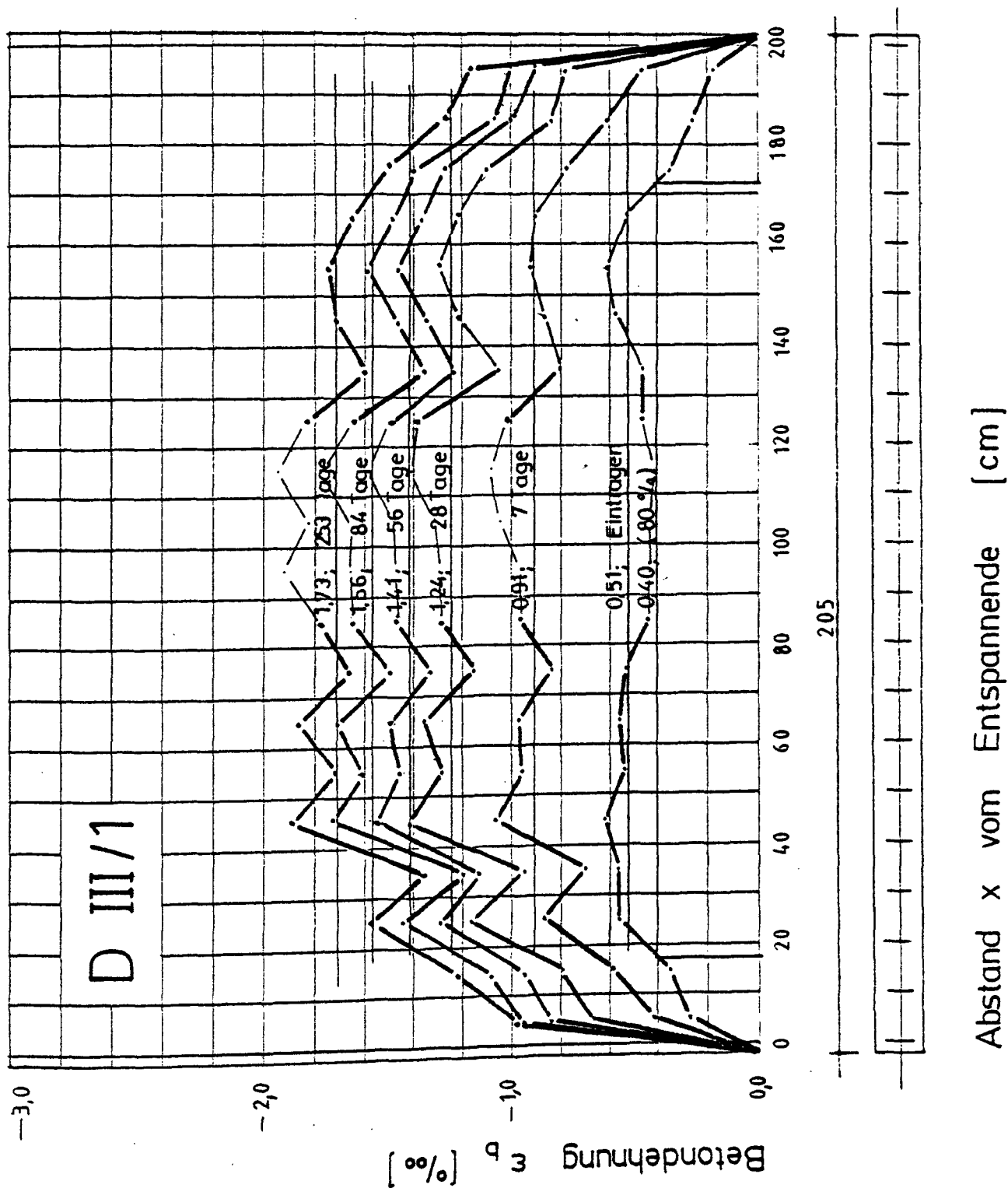
Bild 4.1: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DI/1 in Abhängigkeit von der Zeit



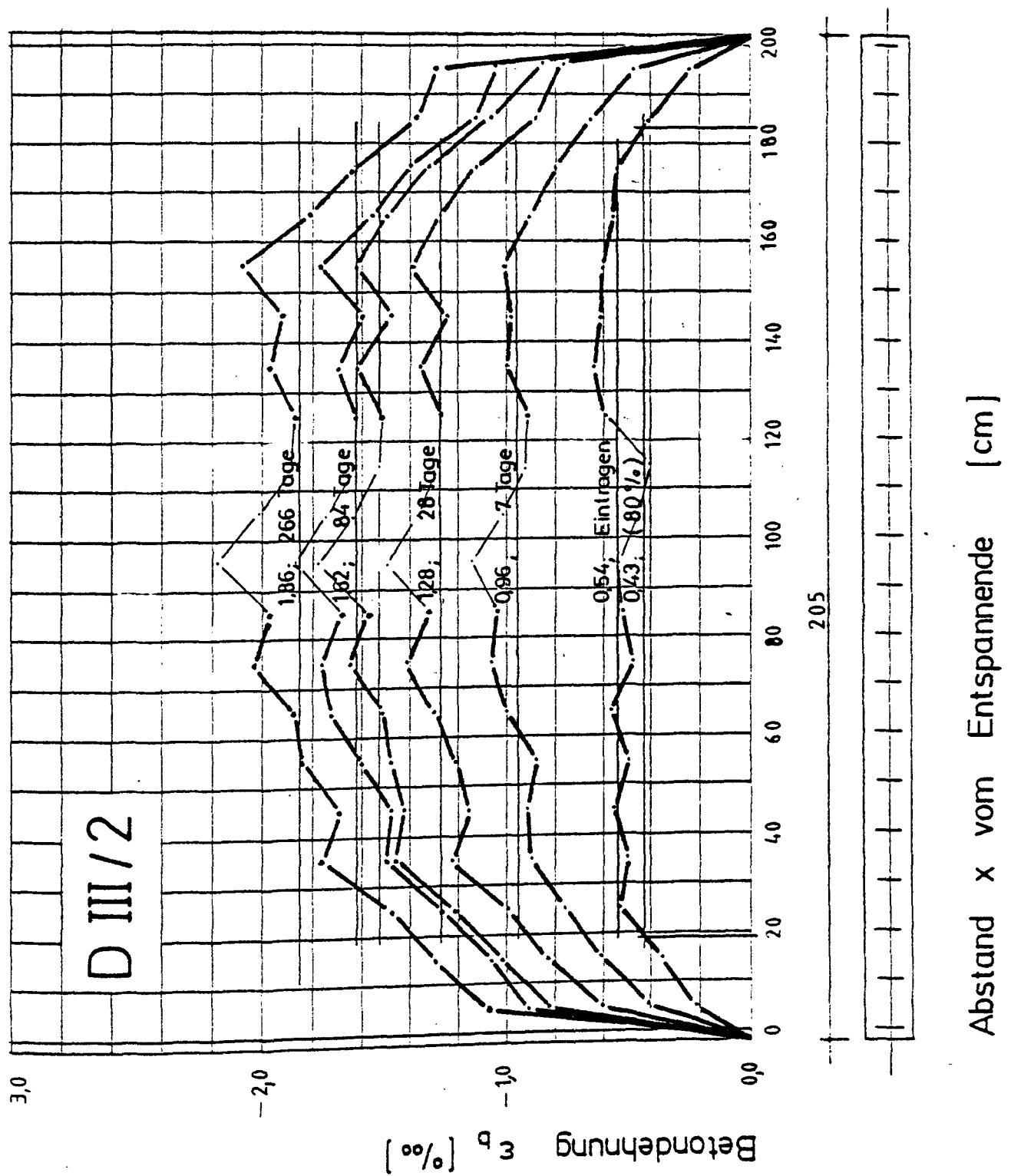
**Bild 4.2:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DI/2 in Abhängigkeit von der Zeit



**Bild 4.3:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DI/3 in Abhängigkeit von der Zeit



**Bild 4.4:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DIII/1 in Abhängigkeit von der Zeit



**Bild 4.5:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers DIII/2 in Abhängigkeit von der Zeit

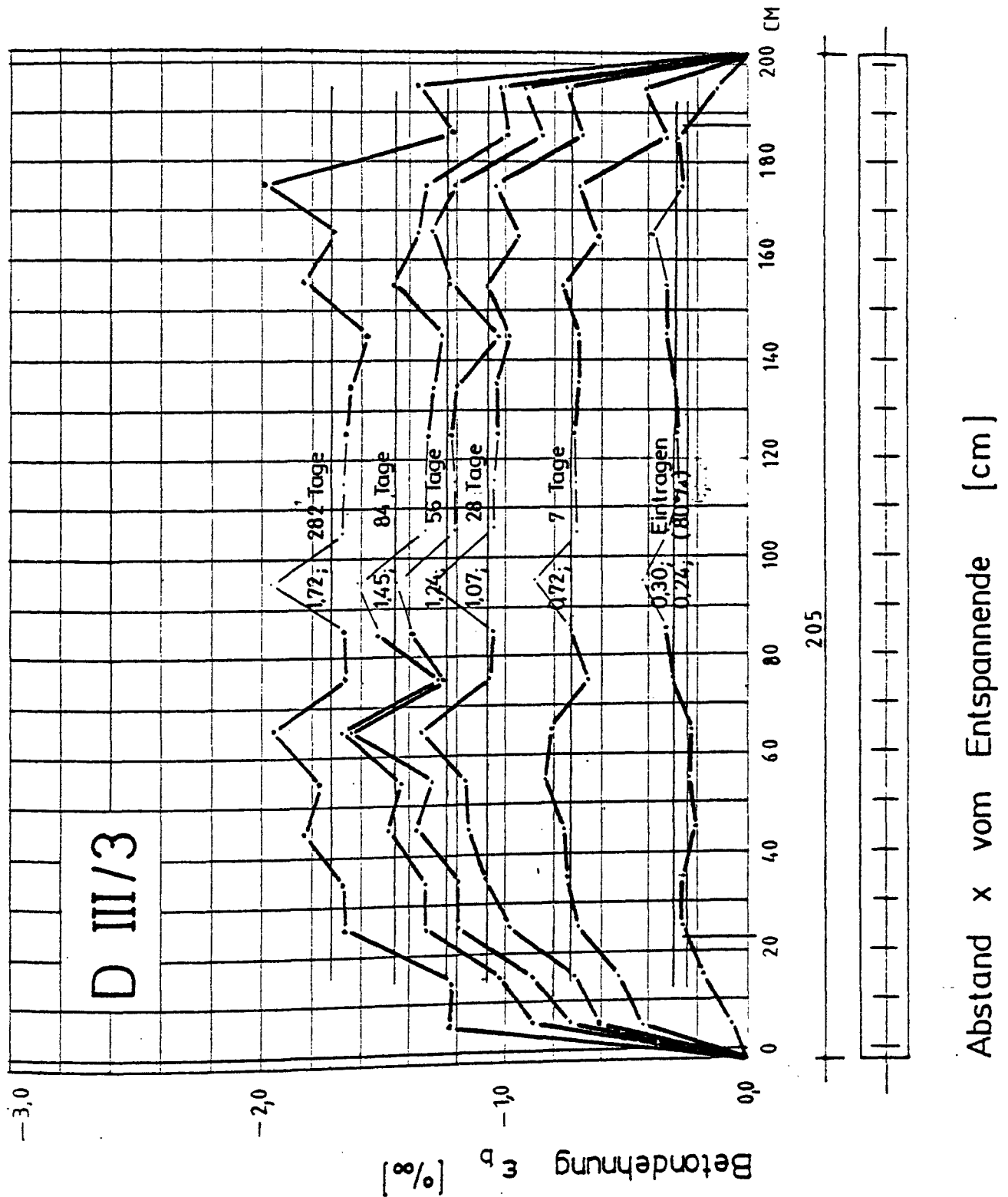
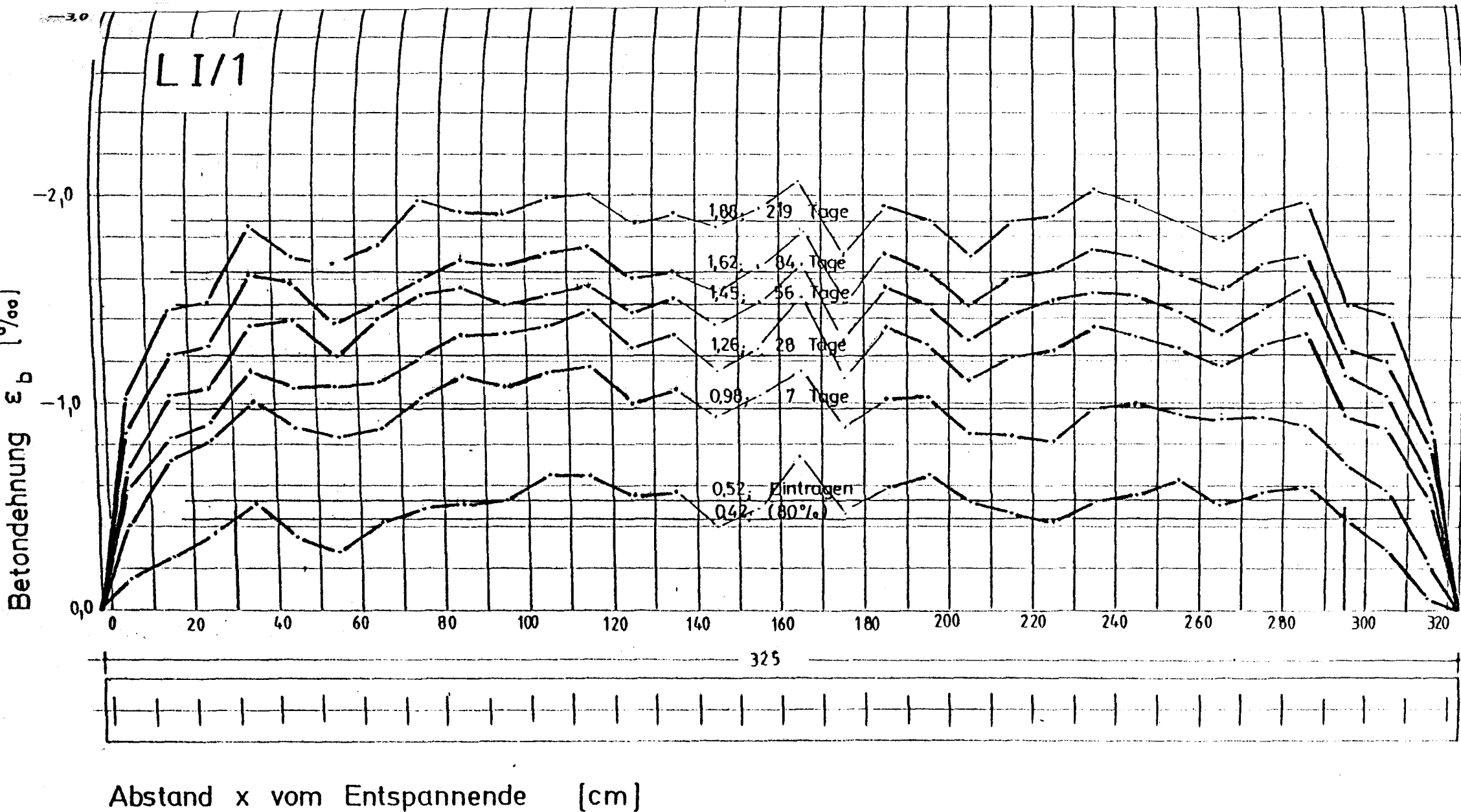
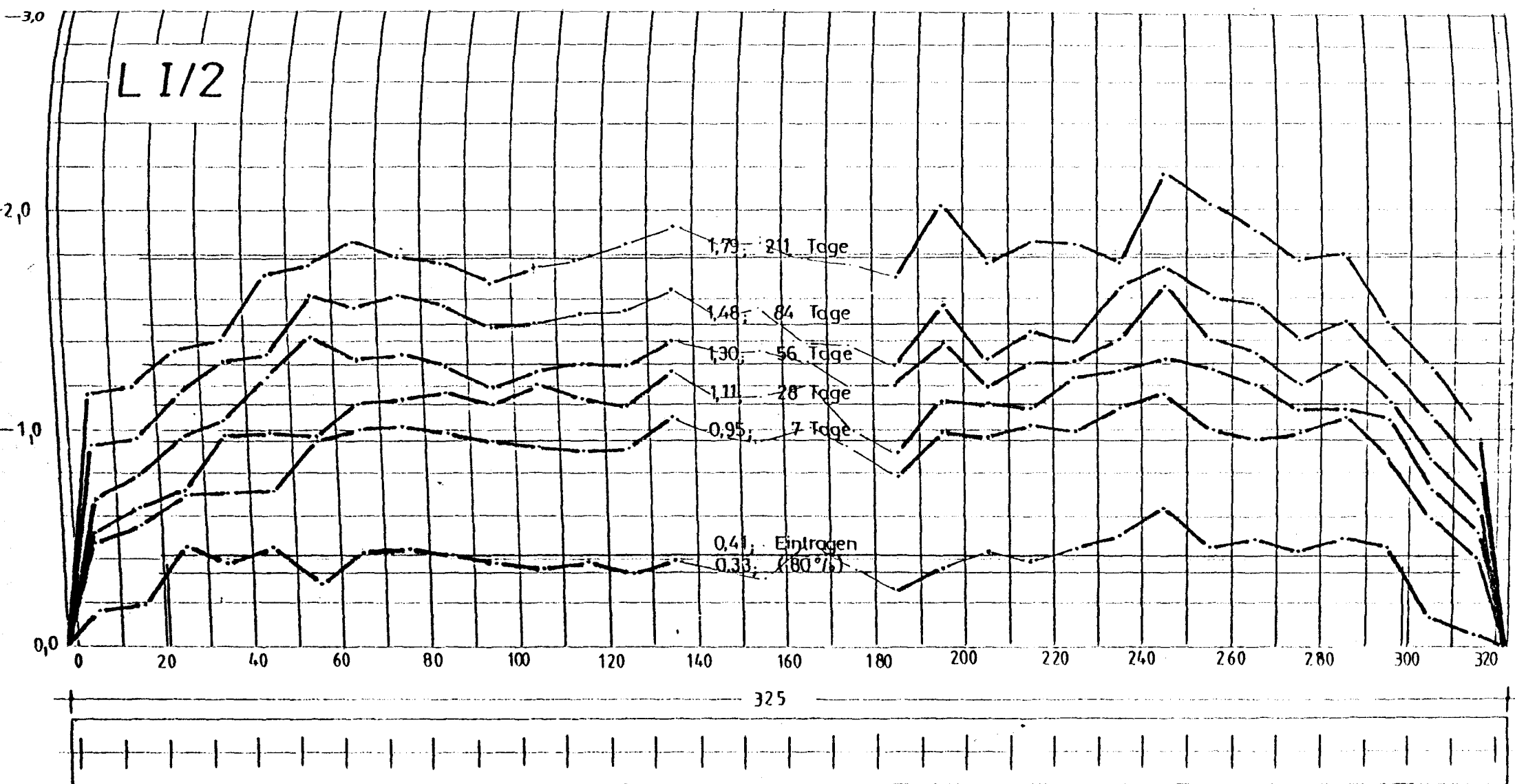


Bild 4.6: Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers D III/3 in Abhängigkeit von der Zeit



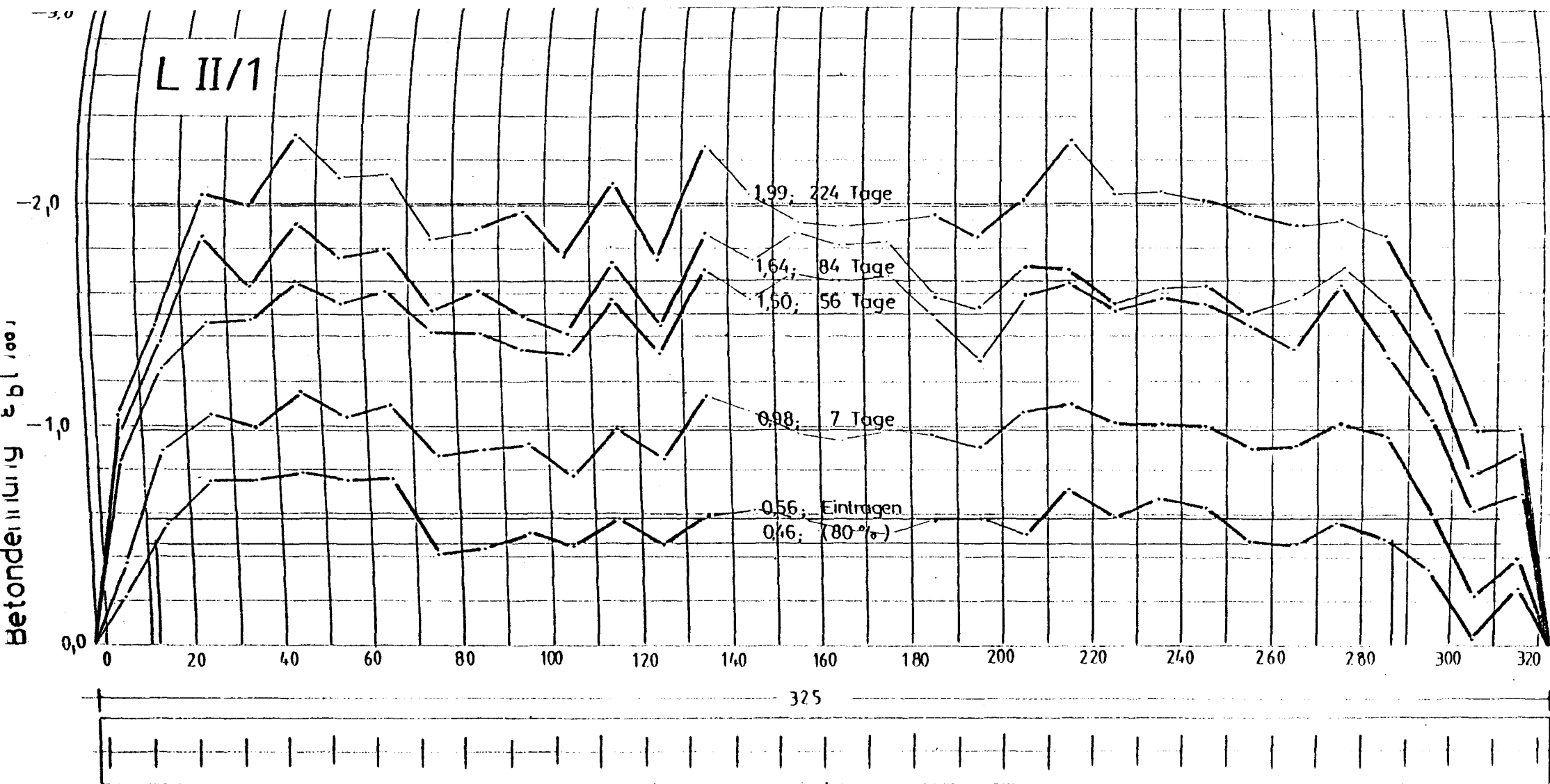
**Bild 4.7:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LI/1 in Abhängigkeit von der Zeit





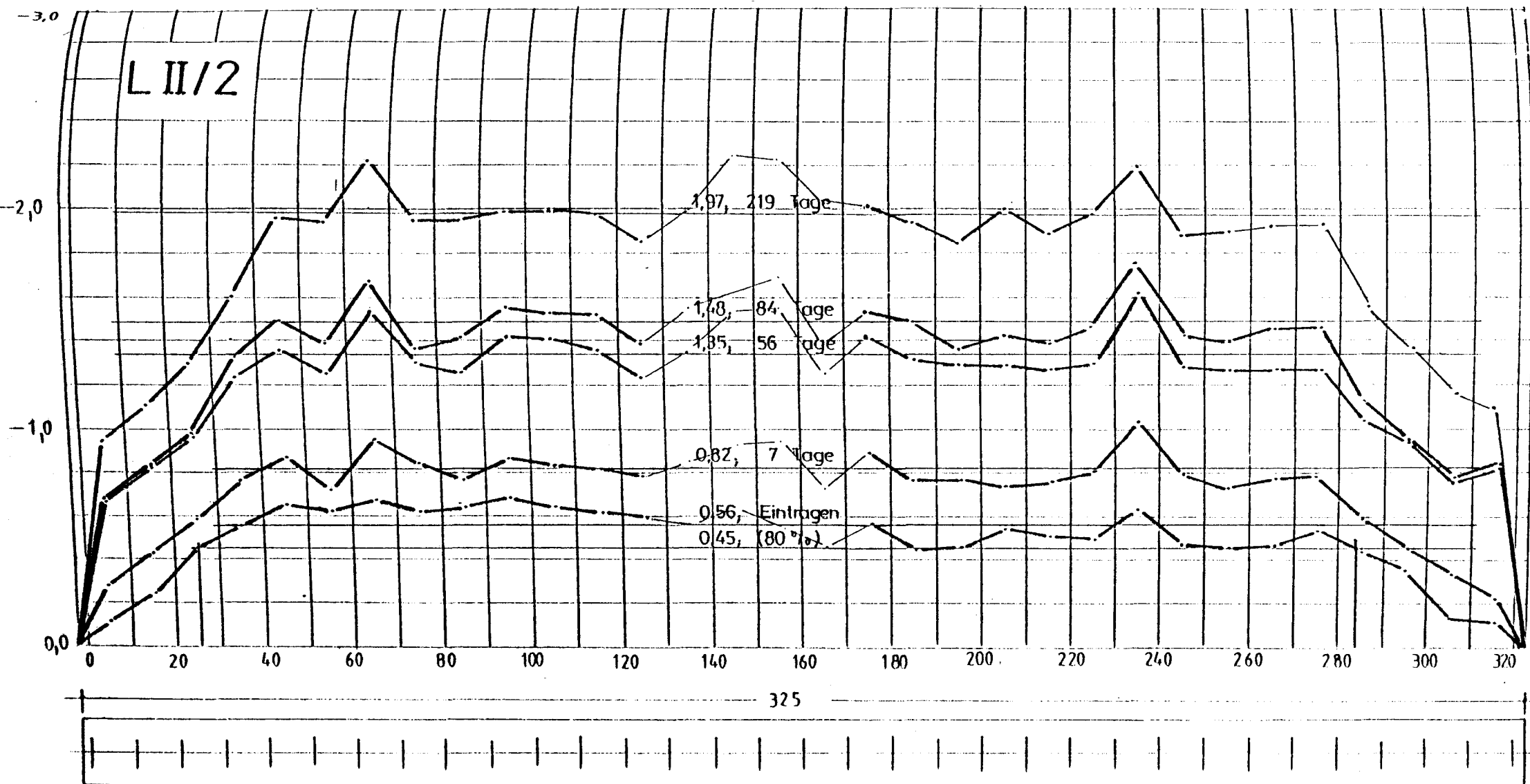
Abstand x vom Entspannende [cm]

**Bild 4.8:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LI/2 in Abhängigkeit von der Zeit



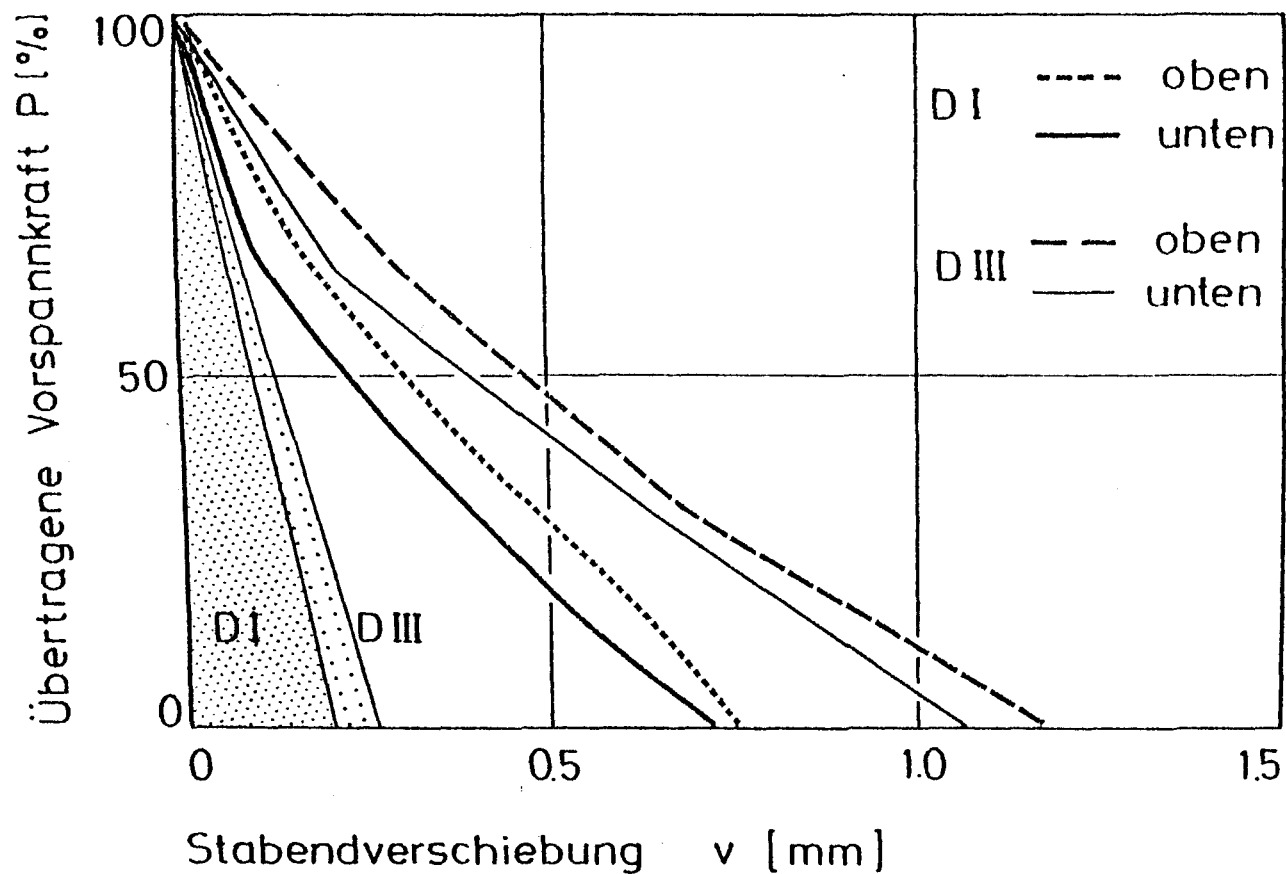
Abstand x vom Entspannende [cm]

**Bild 4.9:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LII/1 in Abhängigkeit von der Zeit

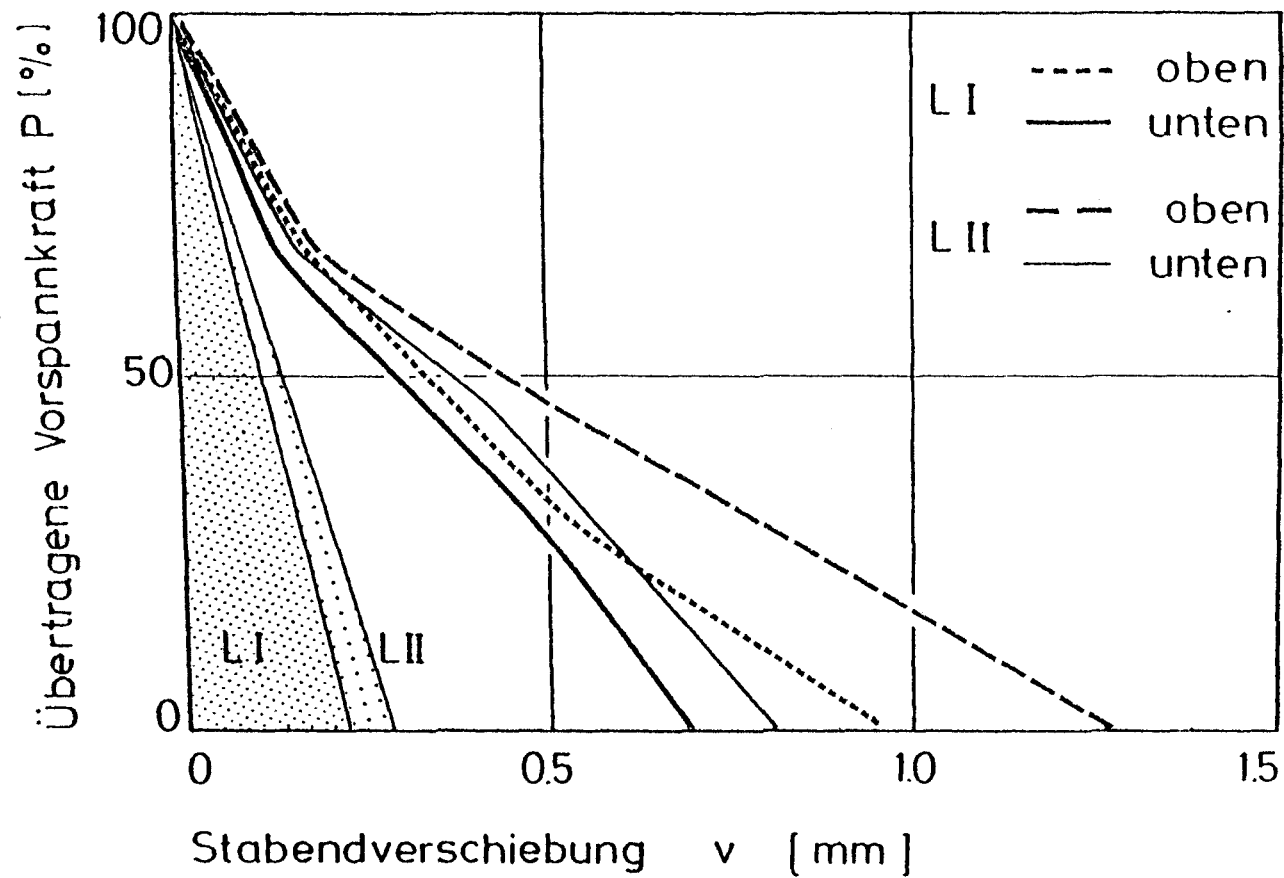


Abstand x vom Entspannende [cm]

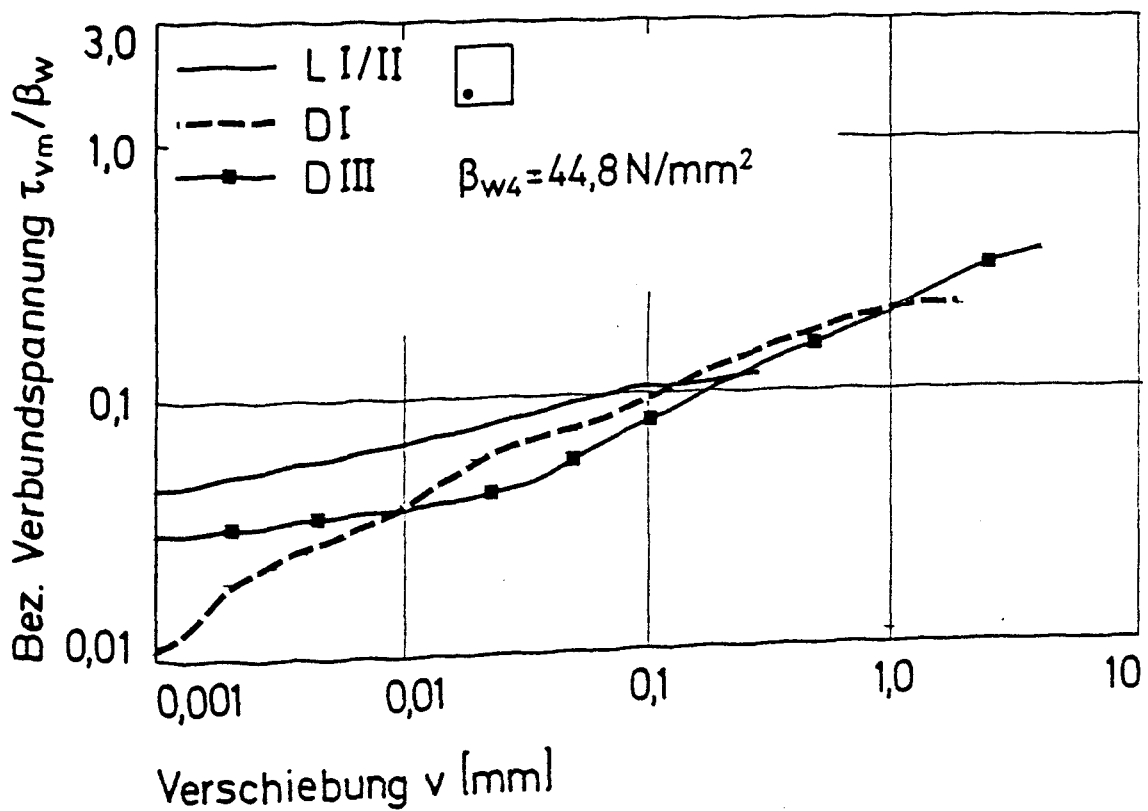
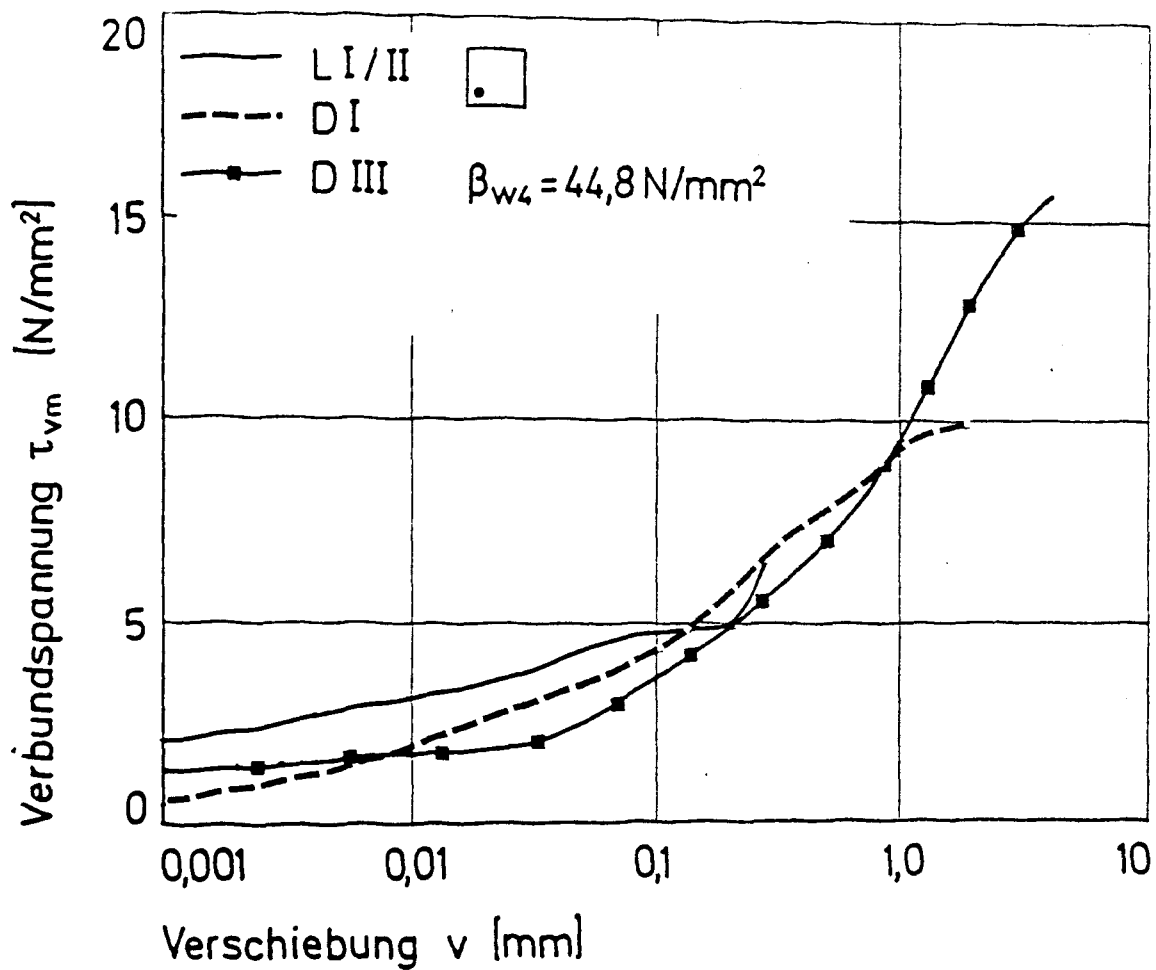
**Bild 4.10:** Betondehnungen über die Balkenlänge und mittlere Betondehnungen des Versuchskörpers LII/2 in Abhängigkeit von der Zeit



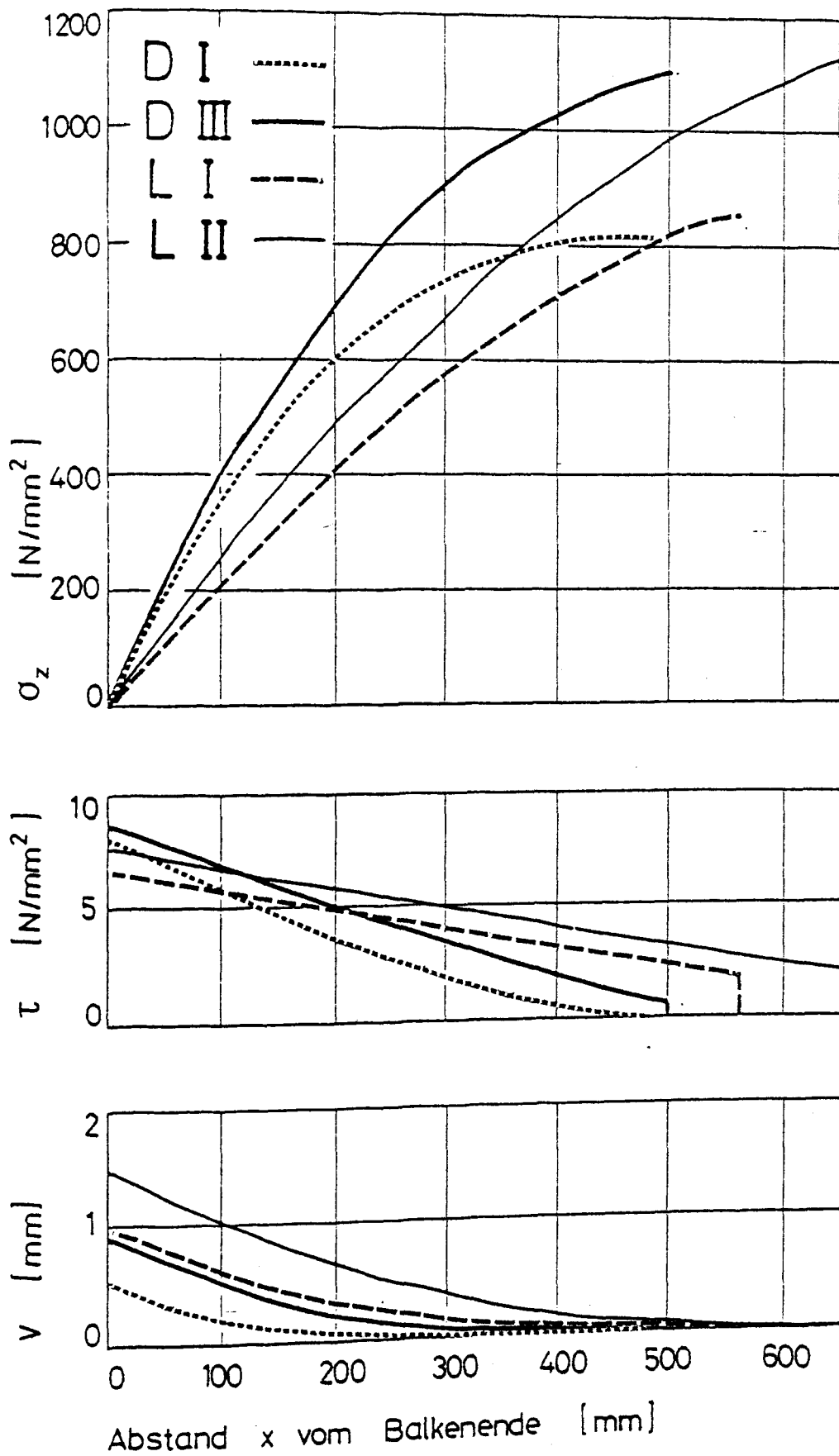
**Bild 4.11:** Stabendverschiebungen der Drähte beim Übertragen der Vorspannung (elast. Dehnung des Stabüberstandes blieb unberücksichtigt, schraffierte Fläche)



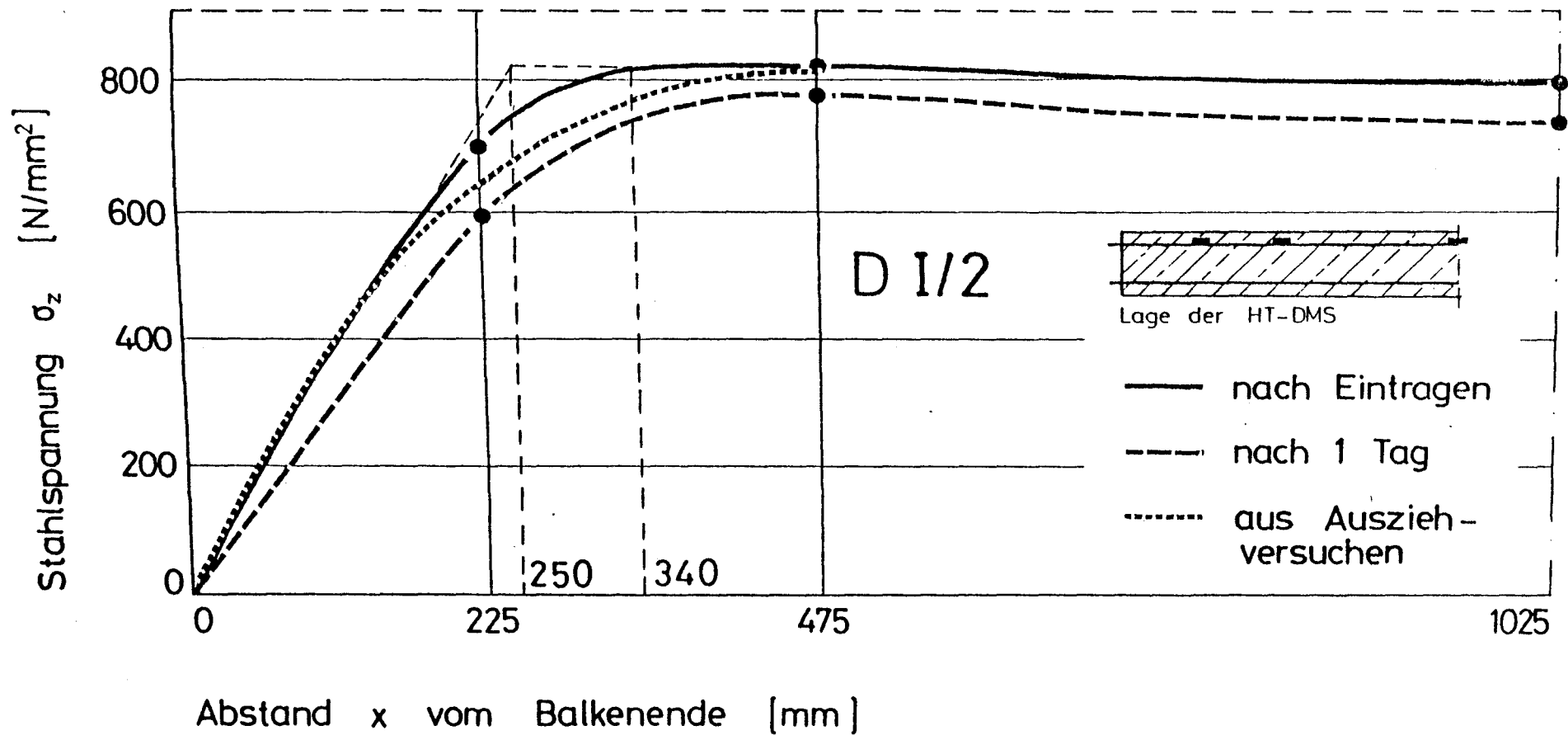
**Bild 4.12:** Stabendverschiebungen der Litzen beim Übertragen der Vorspannung (elast. Dehnung des Stabüberstandes blieb unberücksichtigt, schraffierte Fläche)



**Bild 4.13:** Verbundgesetze für Spanndraht und Litze zum Zeitpunkt des Übertragens der Vorspannung

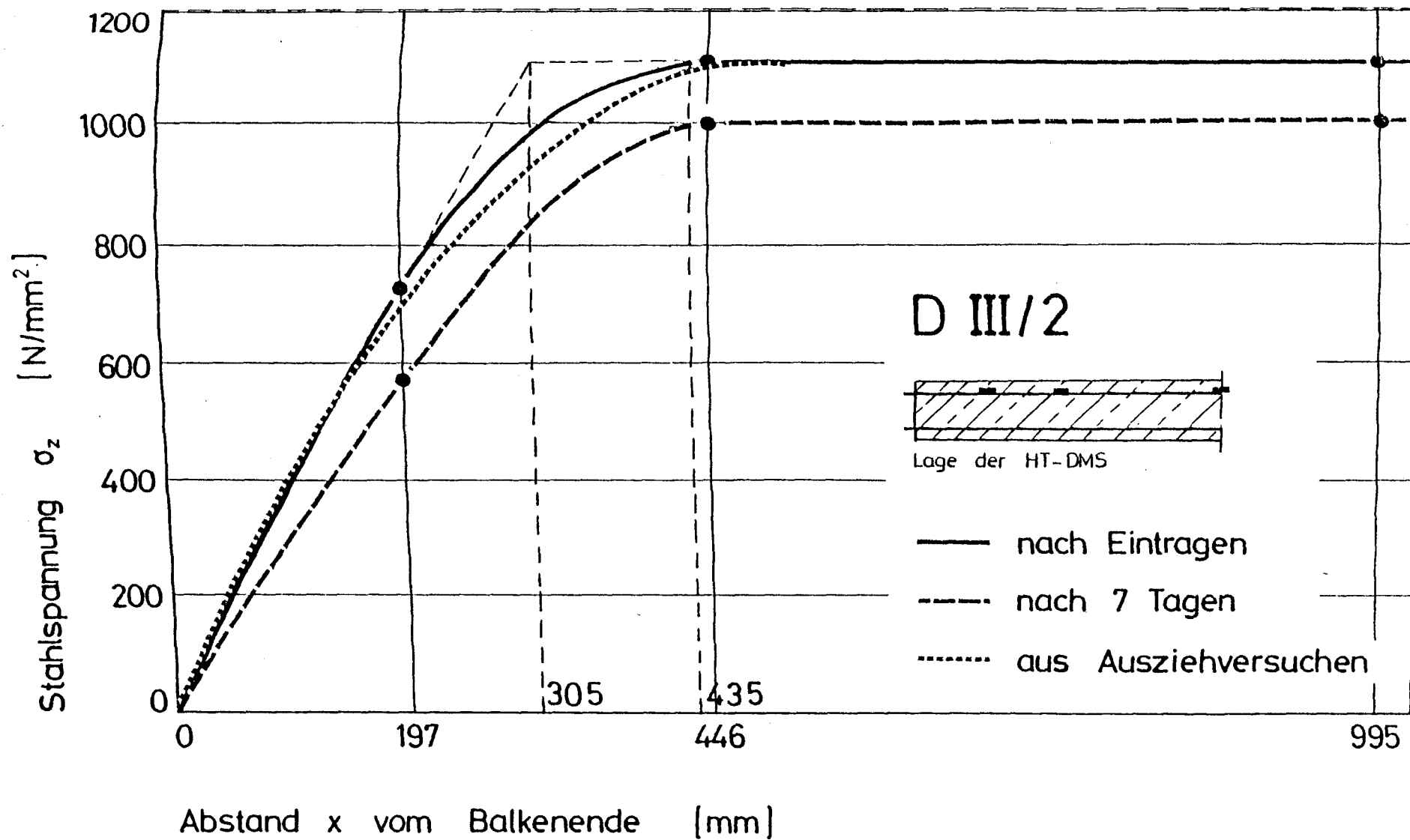


**Bild 4.14:** Stahlspannungs-, Verbundspannungs- und Stabendverschiebungsverlauf über die Übertragungslänge der Versuchskörper



**Bild 4.15:** Stahlspannungsverlauf bis zur Versuchskörpermitte von DI/2





**Bild 4.16:** Stahlspannungsverlauf bis zur Versuchskörpermitte von DIII/2

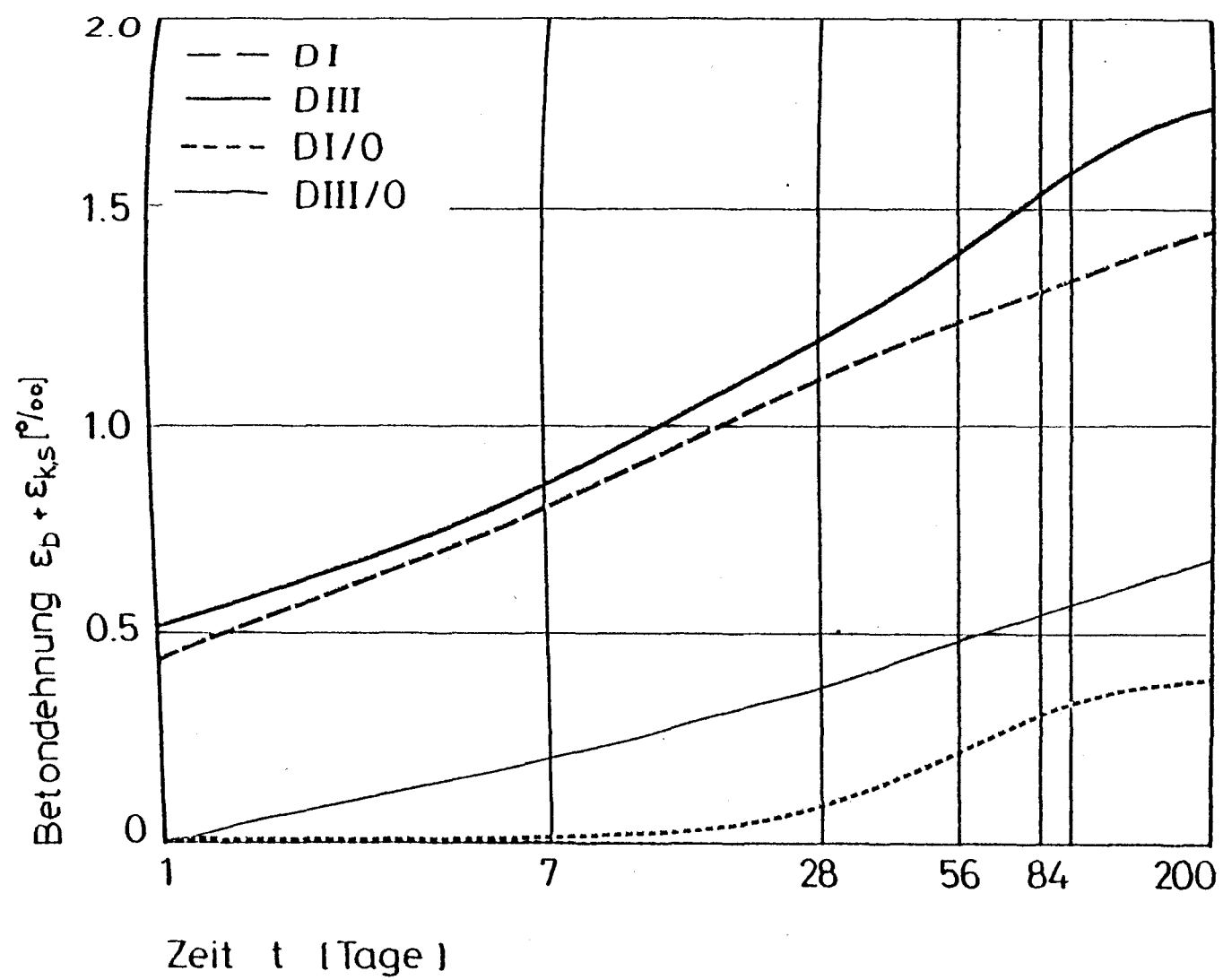


Bild 4.17: Zeitabhängige Dehnungen der D-Körper

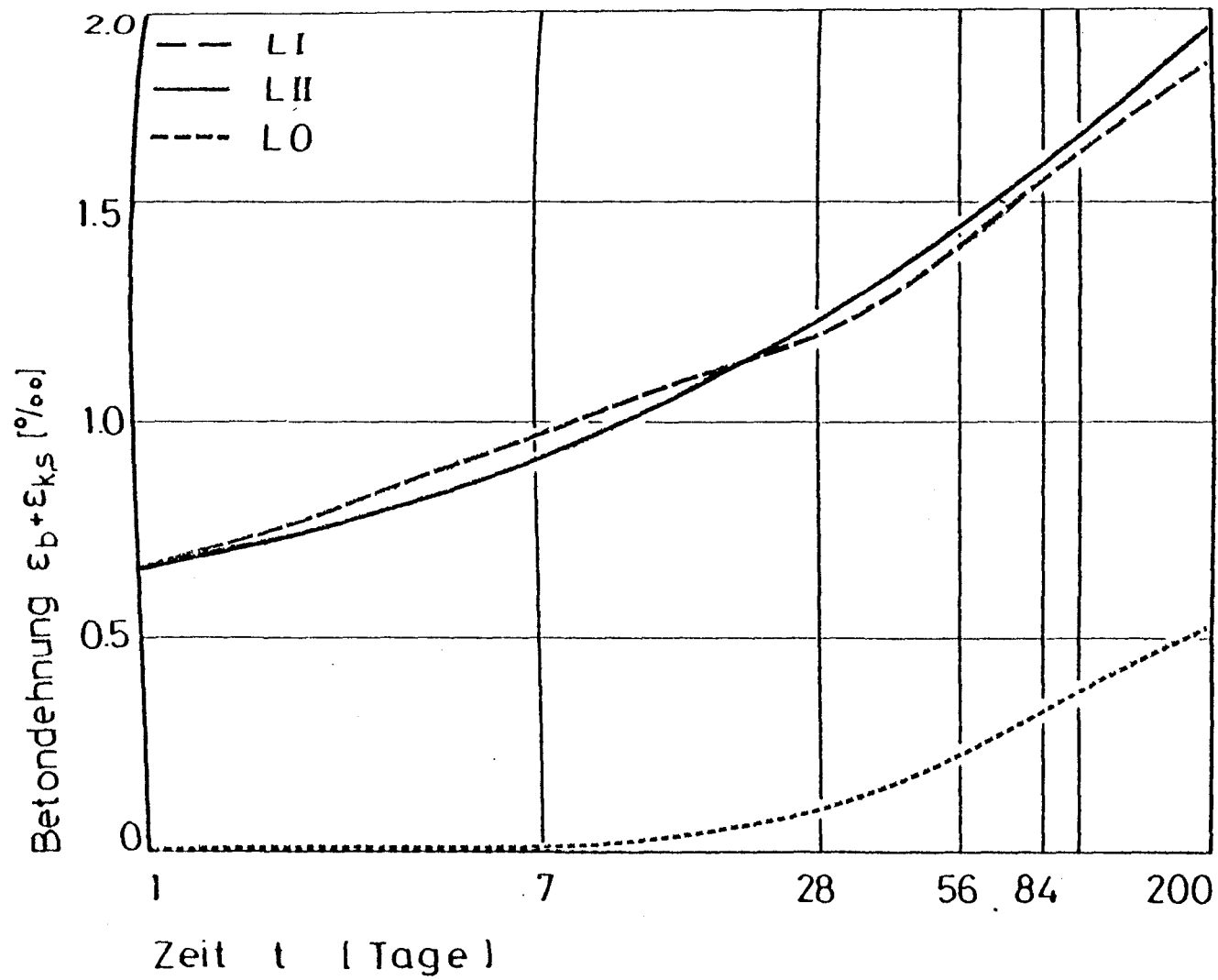
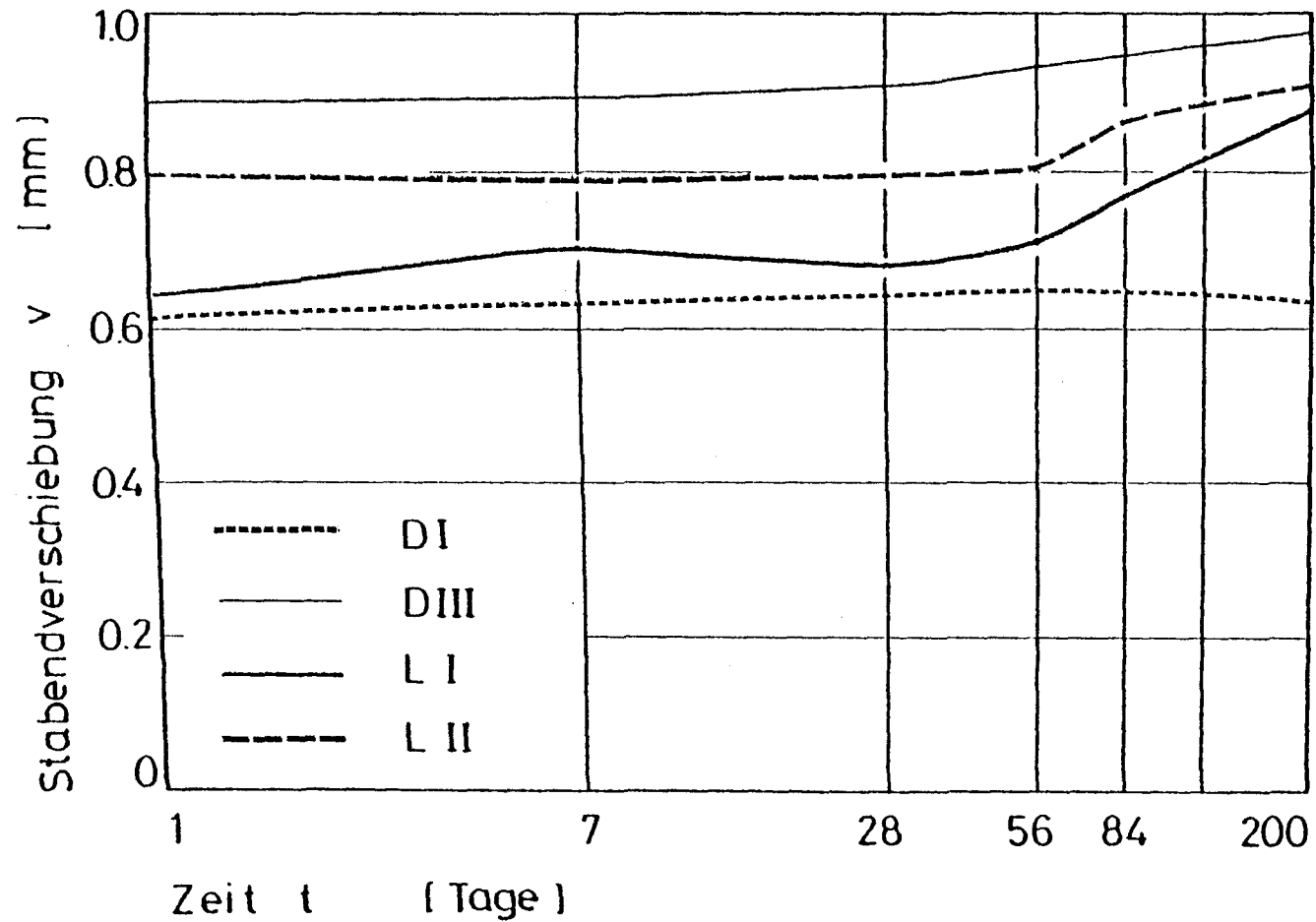


Bild 4.18: Zeitabhängige Dehnungen der L-Körper



**Bild 4.19:** Zeitabhängige Stabendverschiebungen der Versuchskörper

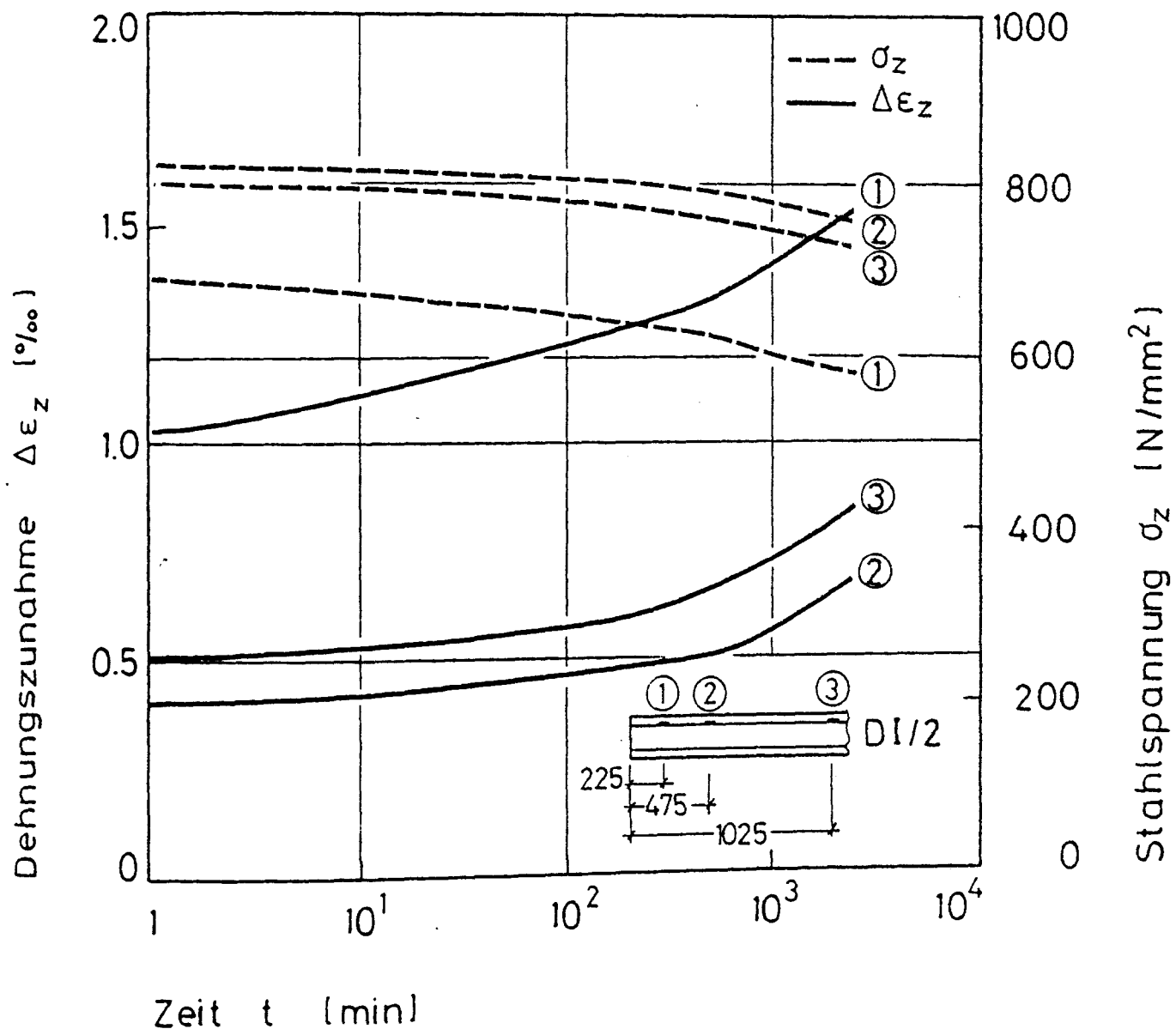


Bild 4.20: Zeitabhängige Stahldehnungsänderungen von DI/2

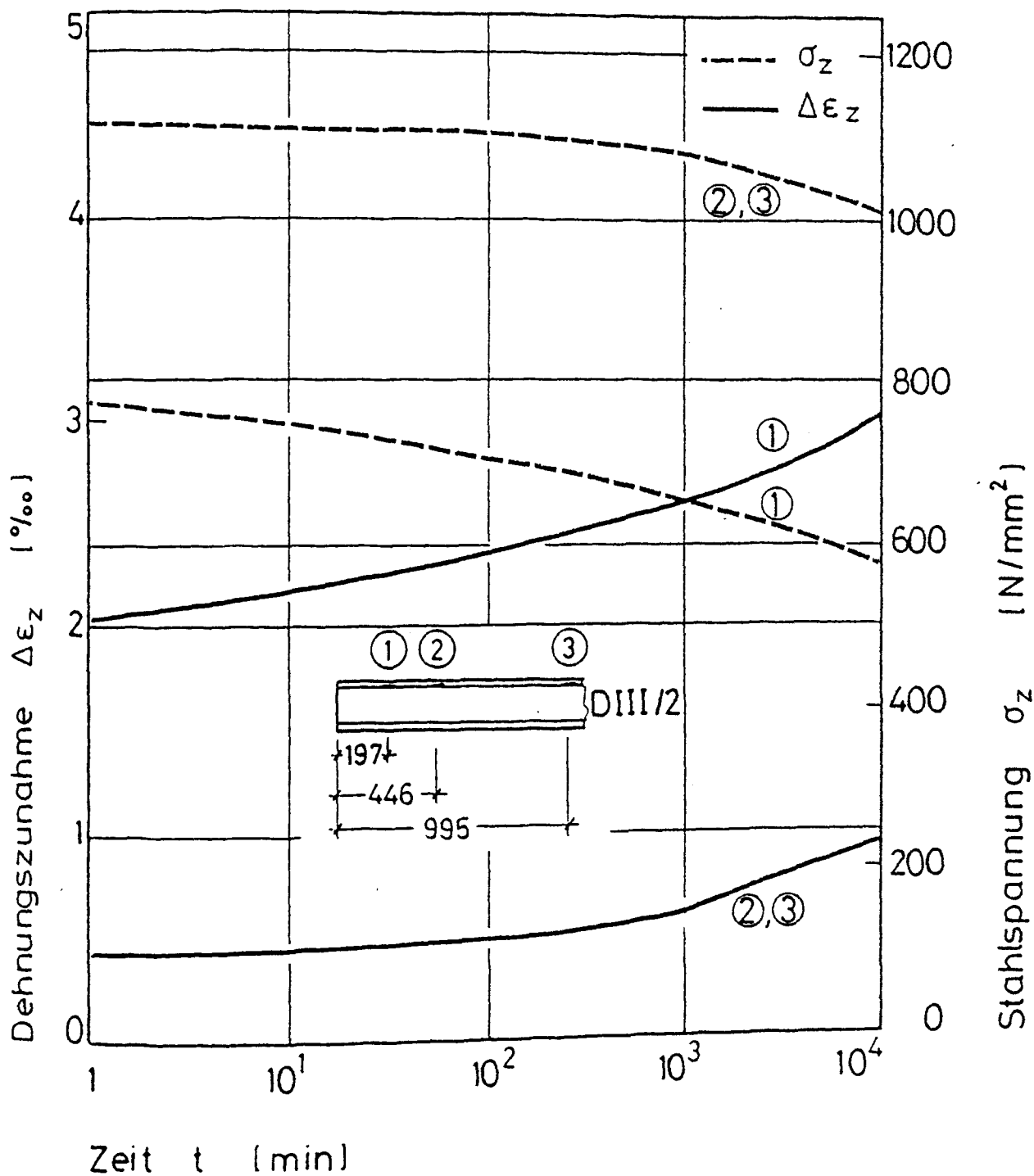
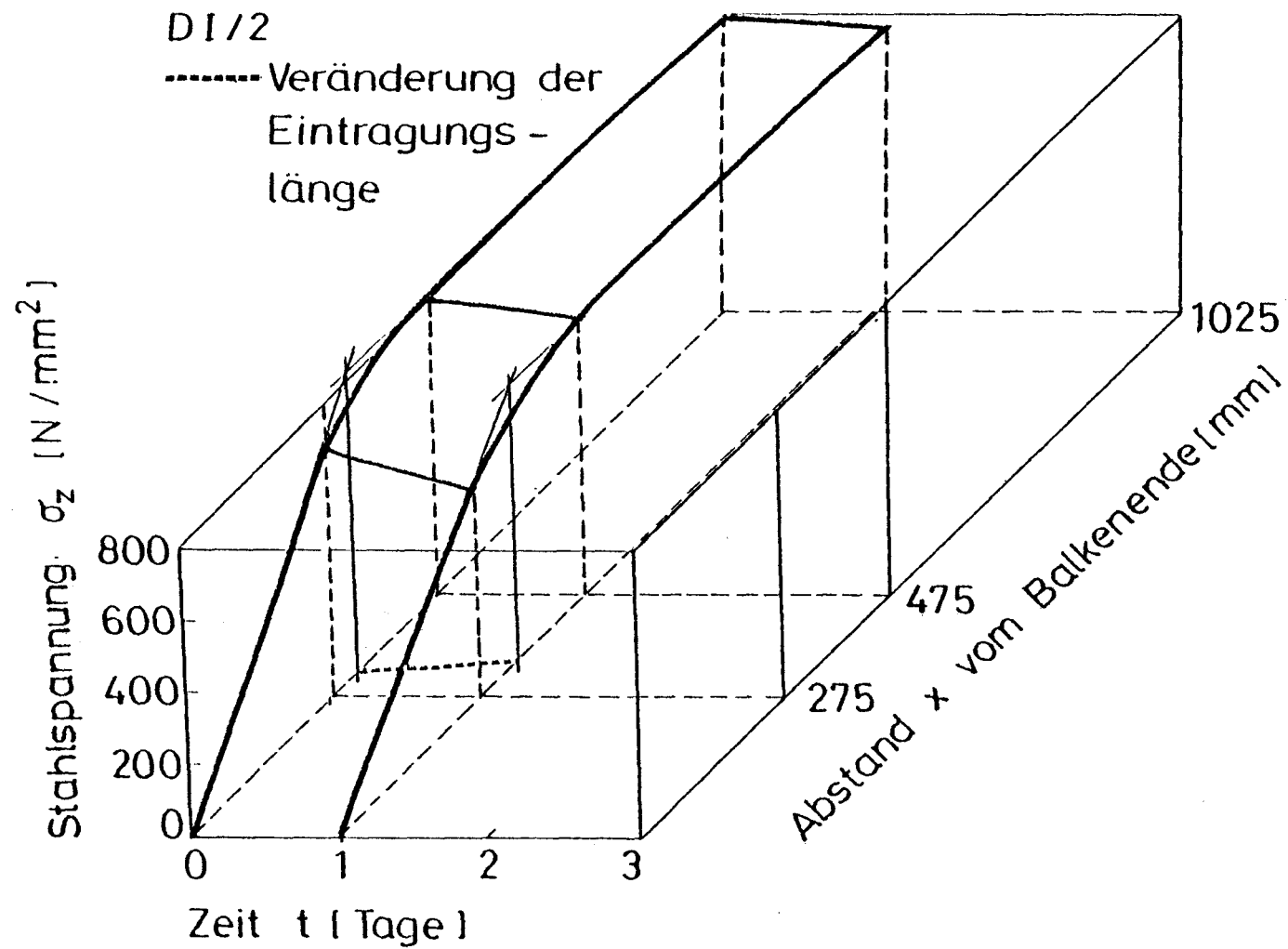


Bild 4.21: Zeitabhängige Stahldehnungsänderungen von DIII/2



**Bild 4.22:** Zeitabhängige Veränderung der Eintragungslänge von DI/2

D III/2

----- Veränderung der  
Eintragungs-  
länge

Stahlspannung  $\sigma_z$  [N/mm<sup>2</sup>]

1200  
800  
400  
0

Zeit  $t$  [Tage]

0

1

2

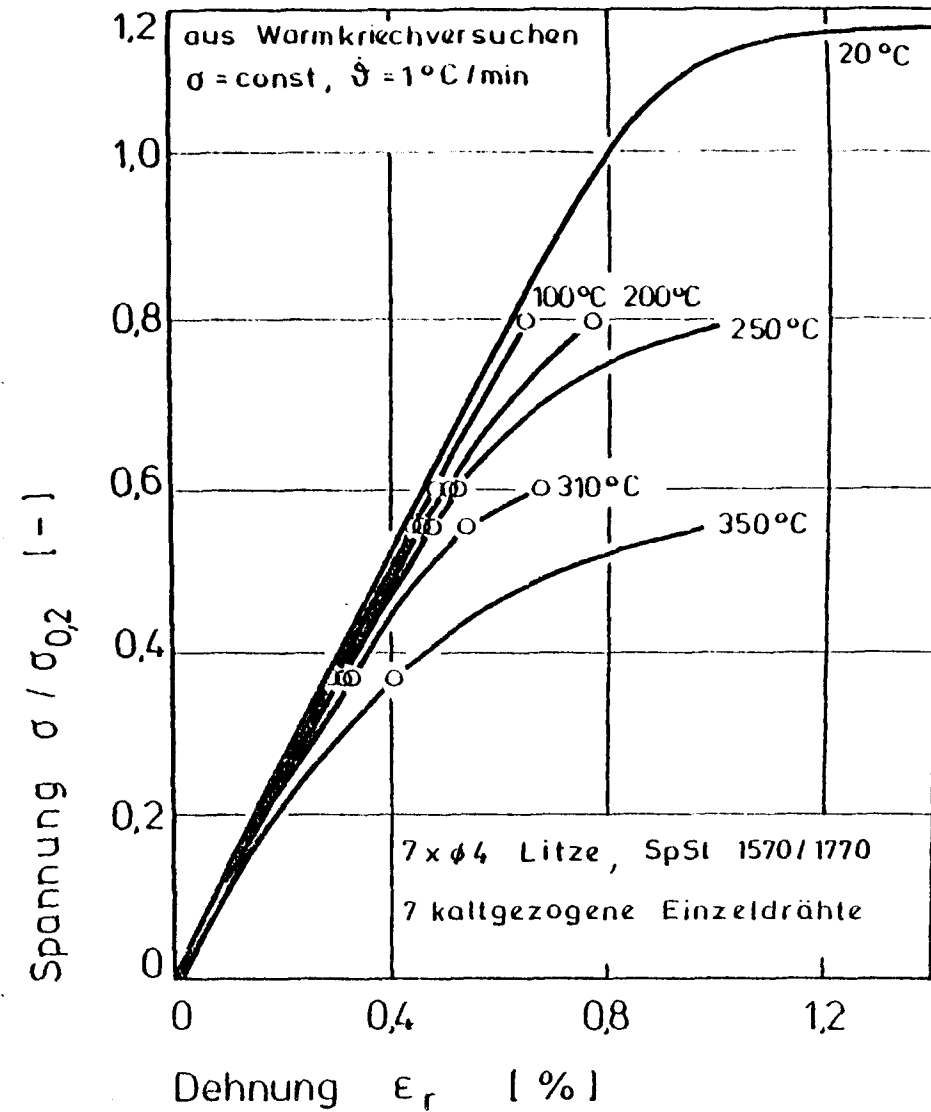
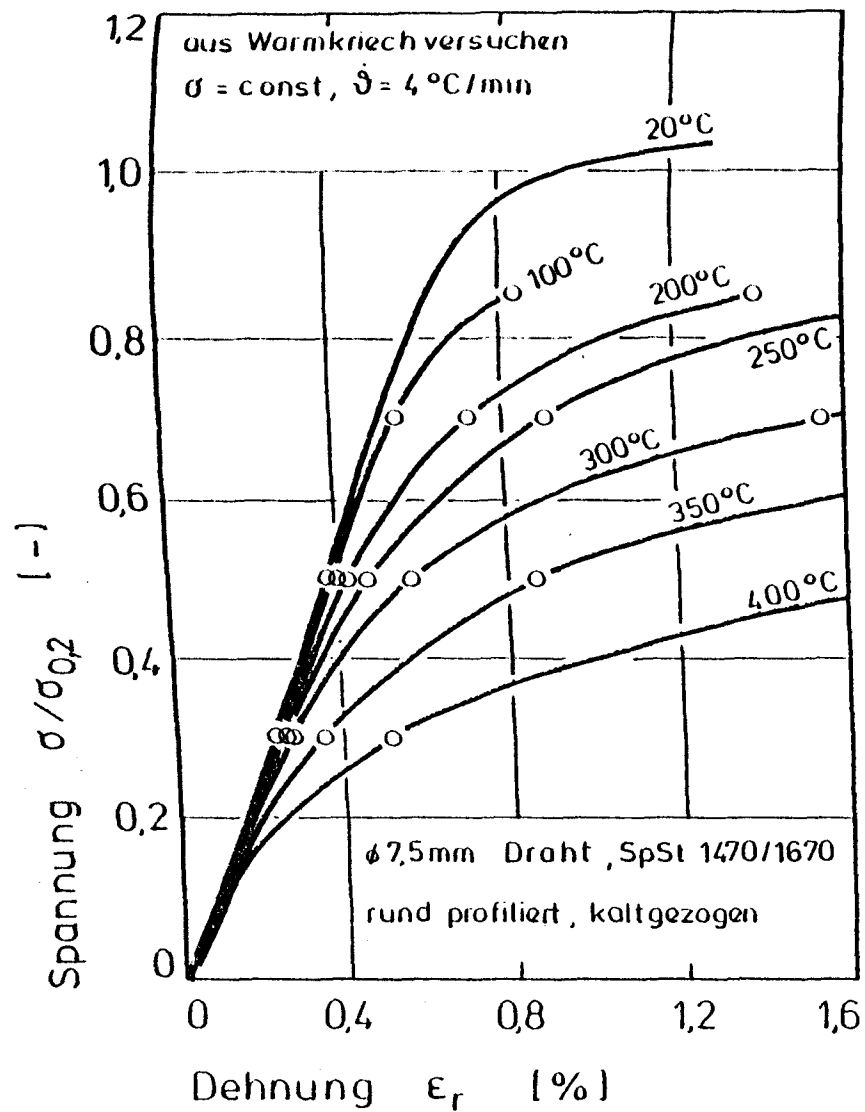
4

7

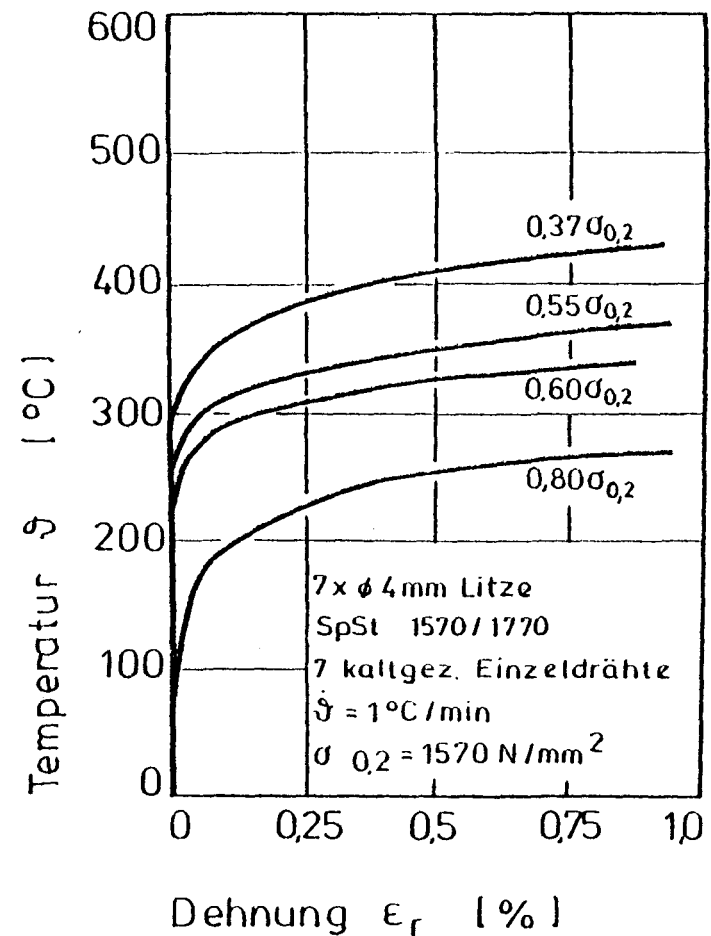
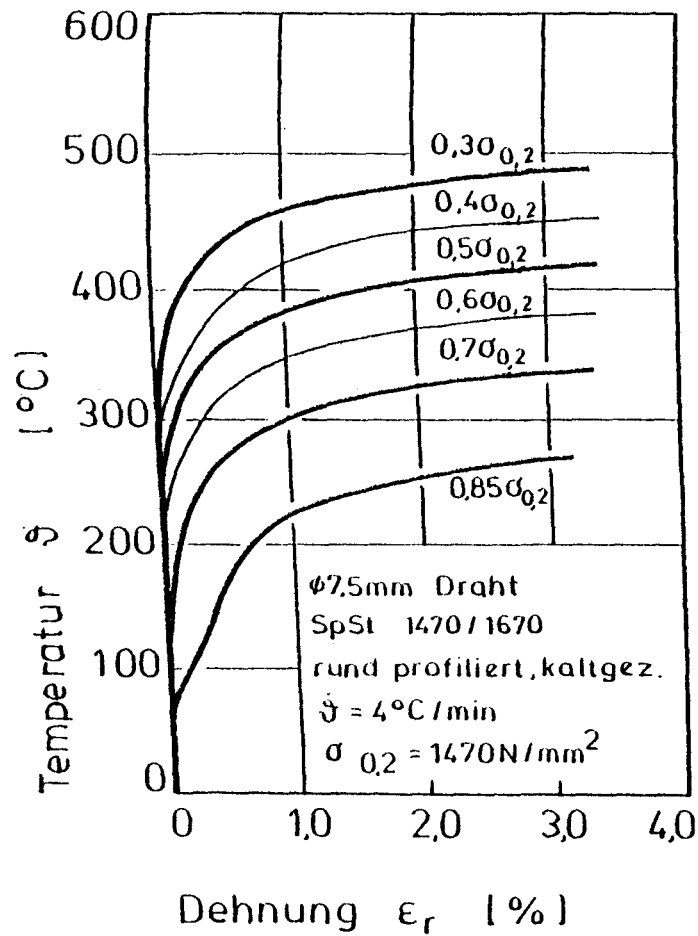
995  
446  
197  
Abstand  $x$  vom Balkenende [mm]

**Bild 4.23:** Zeitabhängige Veränderung der Eintragungslänge von DIII/2





**Bild 5.1:** Spannungs-Dehnungslinien für hohe Temperaturen von Spanndraht und Litze



**Bild 5.2:** Temperatur-Dehnungskurven für Spanndraht und Litze

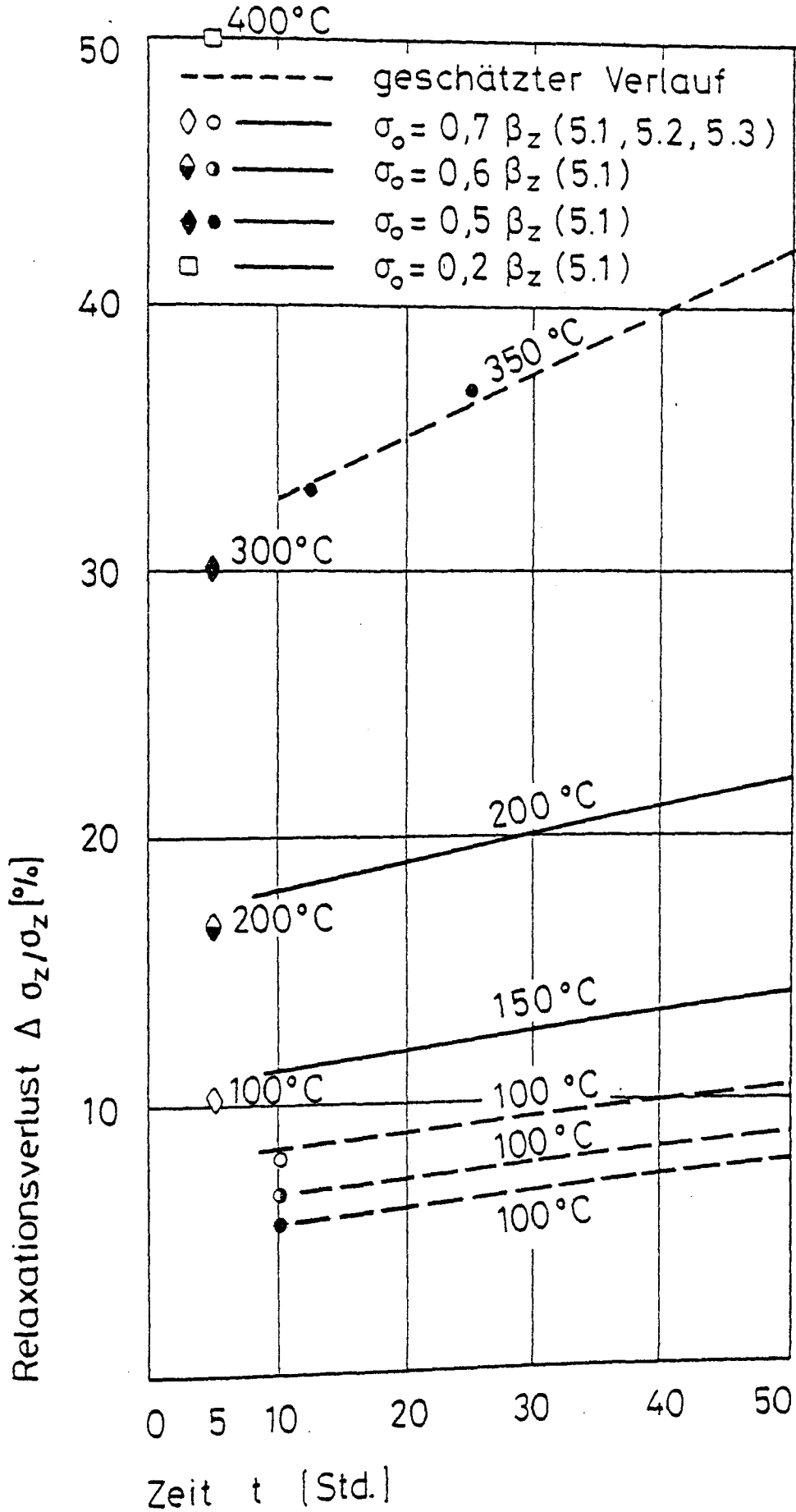
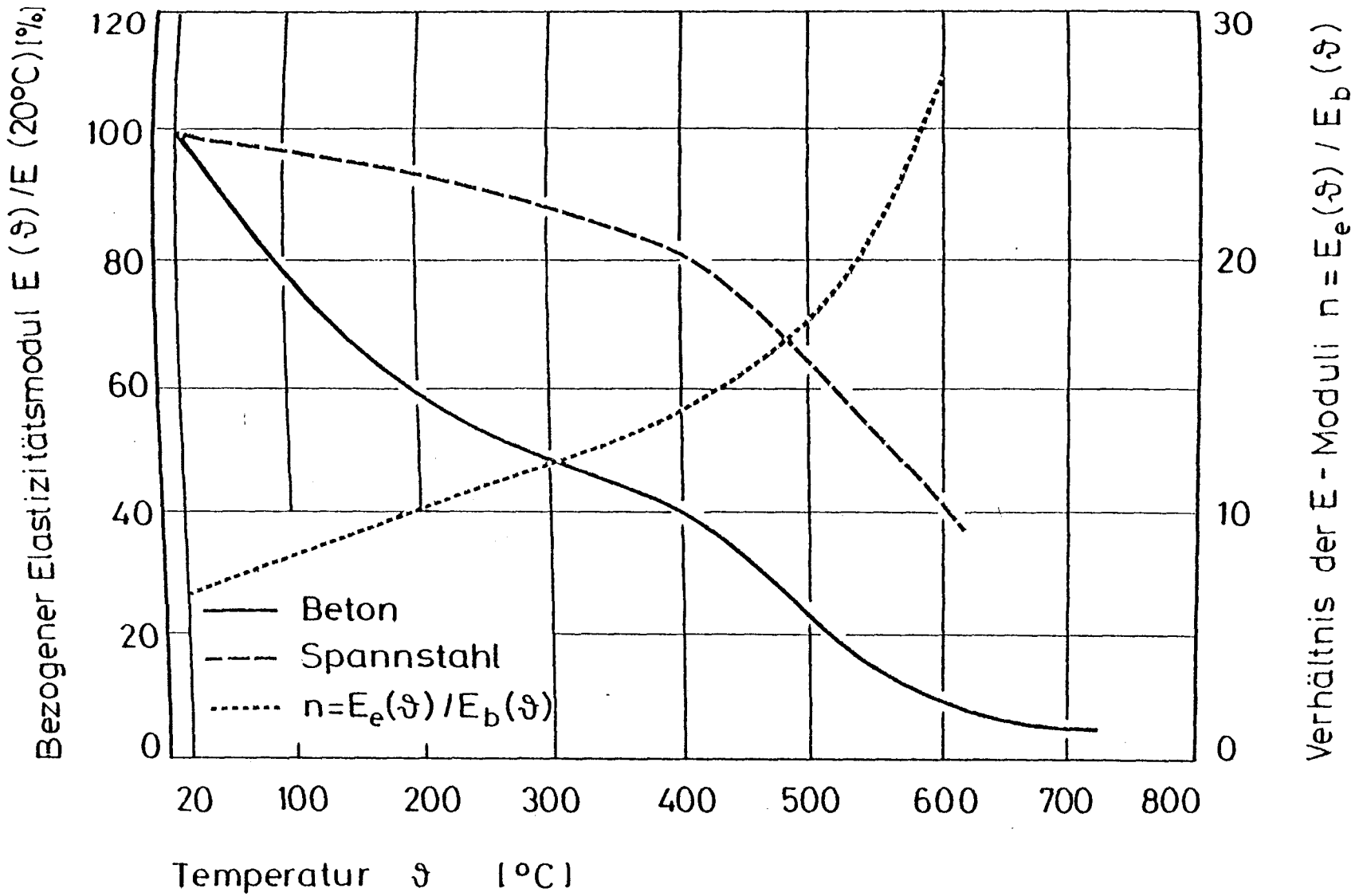
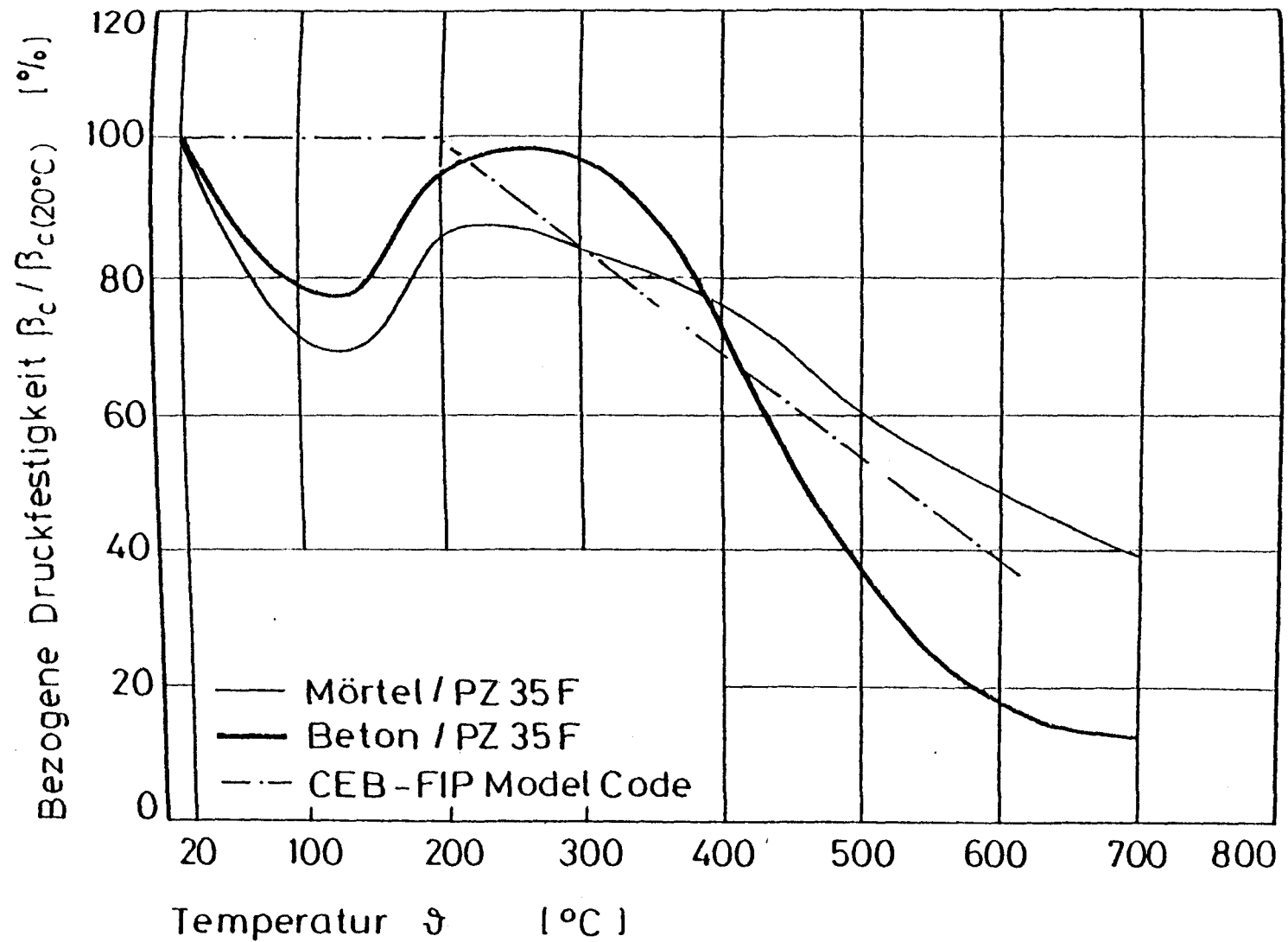


Bild 5.3: Relaxationsverhalten von Spannstahl

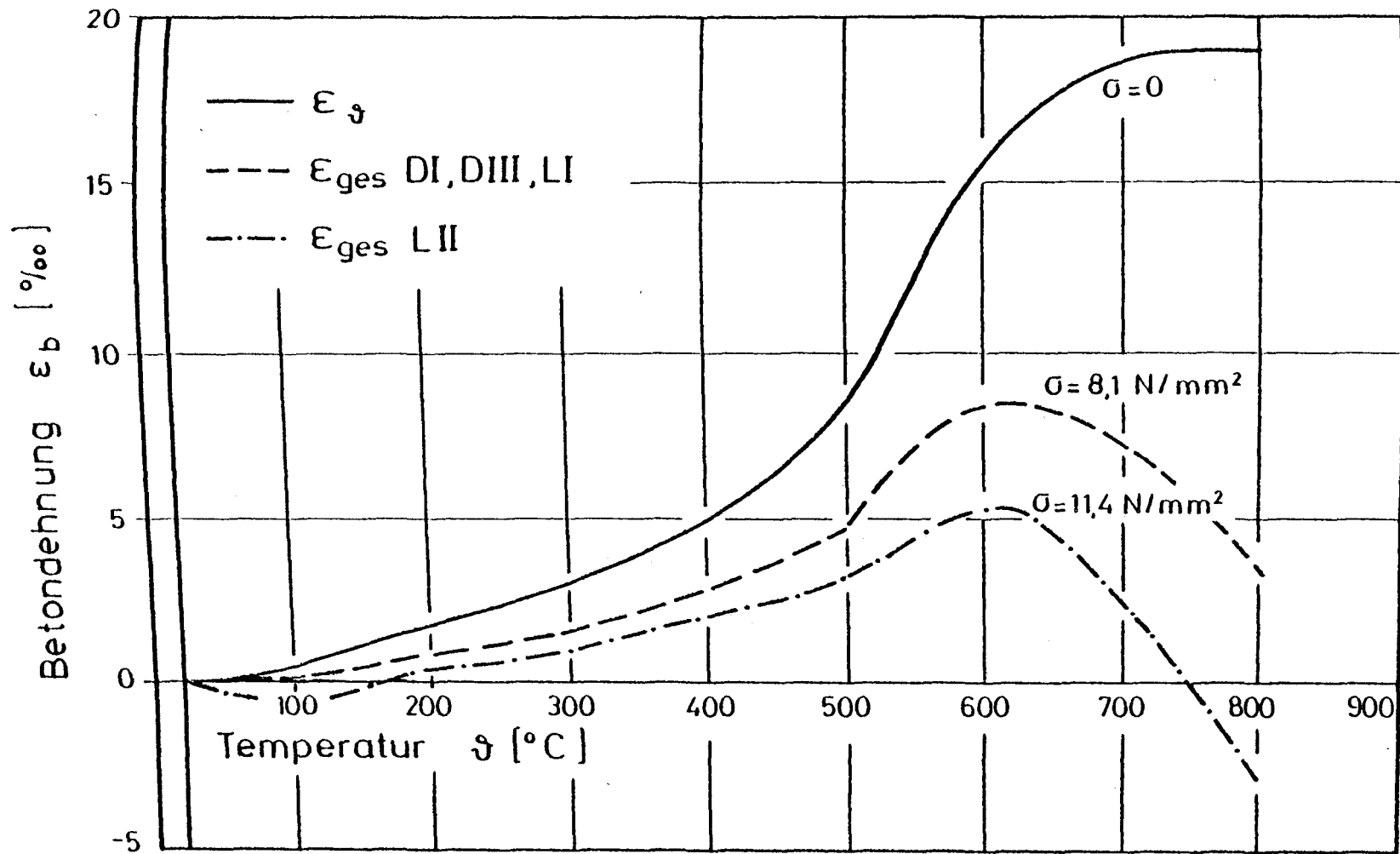
(aus der Literatur abgeschätzt)



**Bild 5.4:** Temperaturabhängige Veränderung der E-Moduli von Beton und Spannstahl



**Bild 5.5:** Temperaturabhängige Veränderung der Druckfestigkeit von Mörtel und dem verwendeten Beton B 55 mit quarzitischem Zuschlag



**Bild 5.6:** Temperaturabhängige instationäre Dehnungsänderungen unter konstanter Last nach Schneider [5.5]

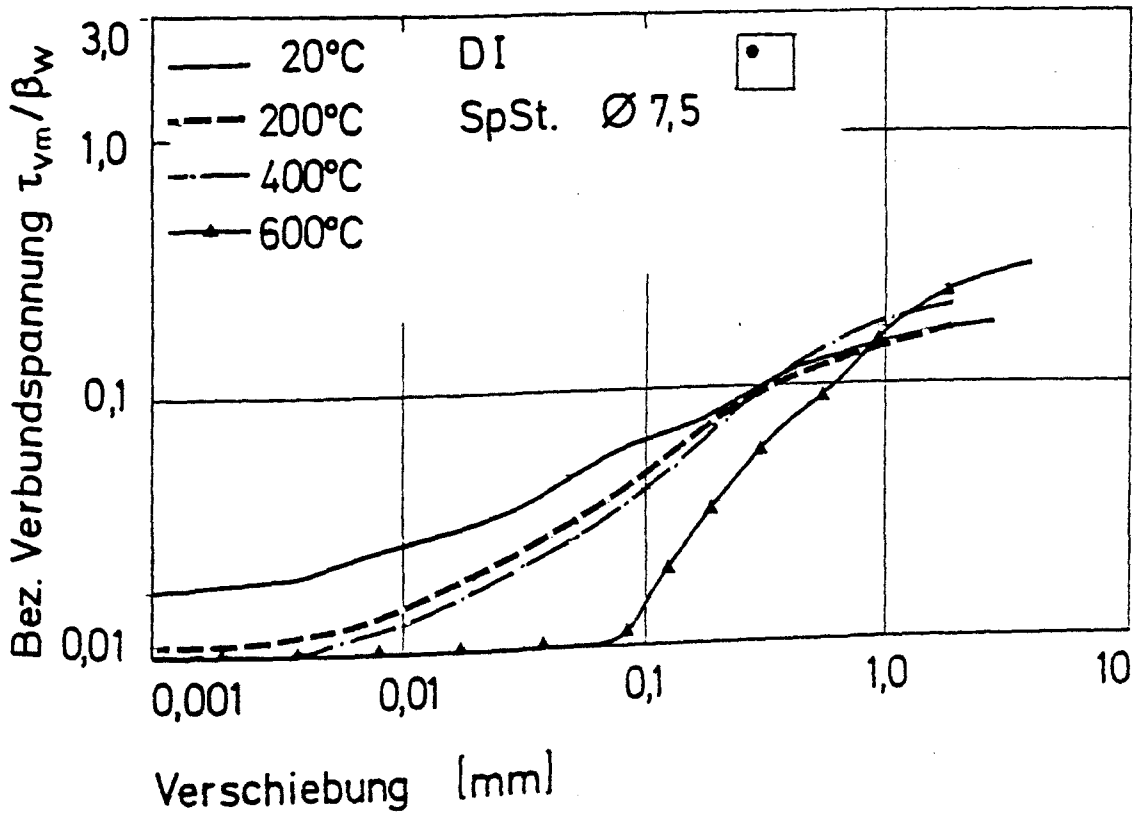
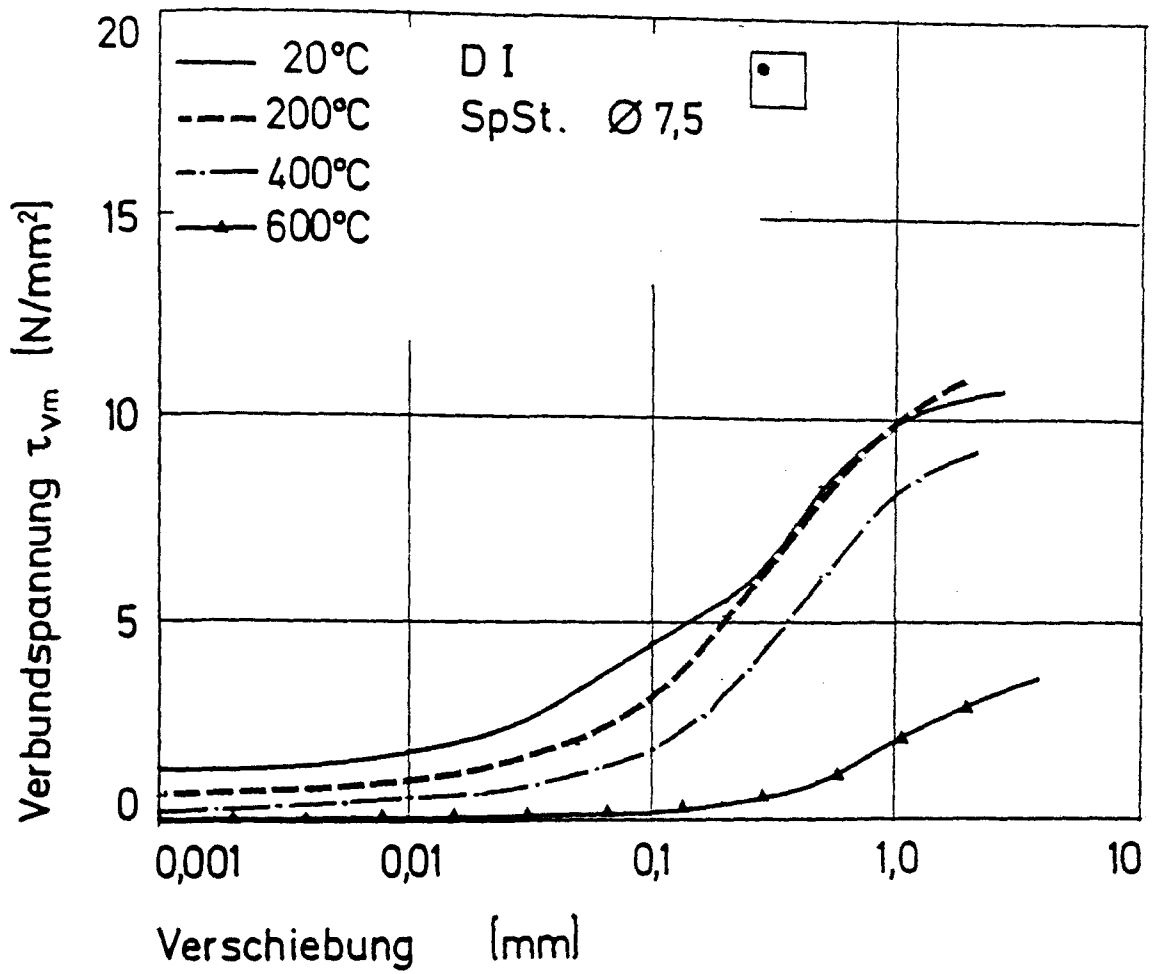


Bild 5.7: Verbundgesetze für hohe Temperaturen  
 von Spanndraht Ø 7,5 mm (DI)

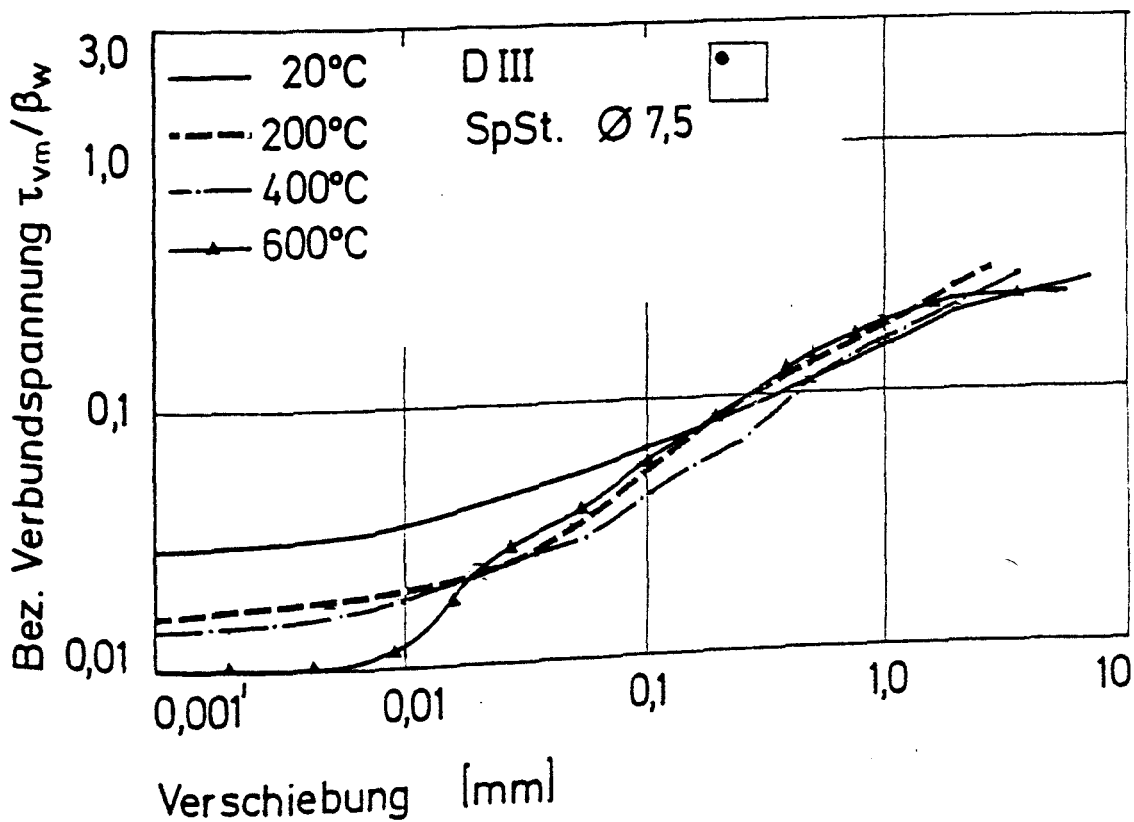
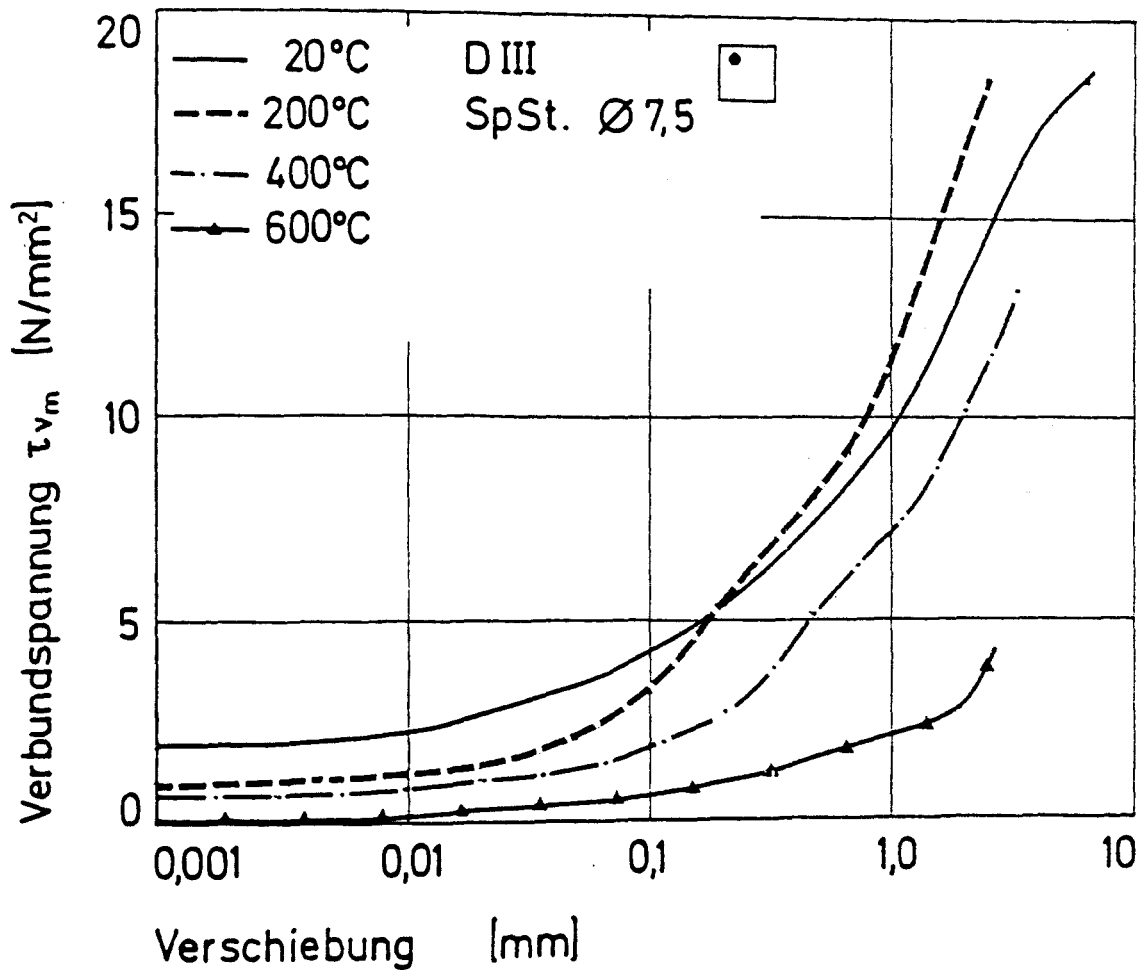


Bild 5.8: Verbundgesetze für hohe Temperaturen von Spanndraht Ø 7,5 mm (DIII)



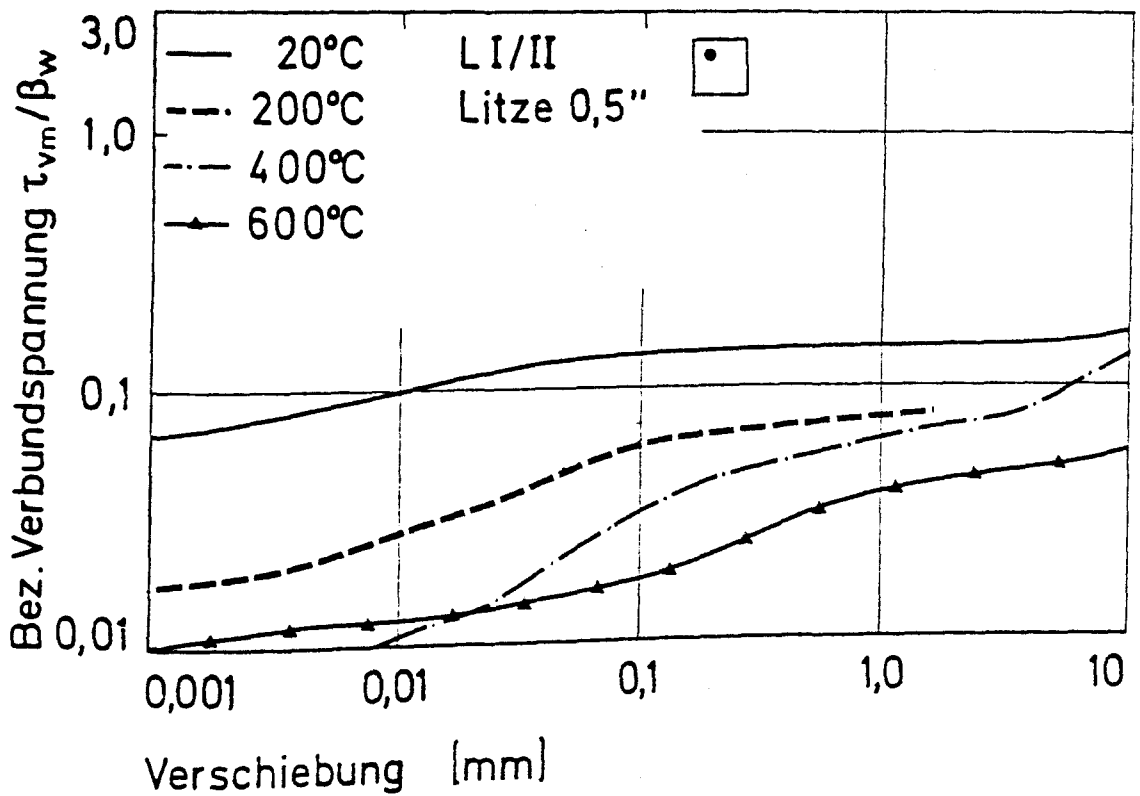
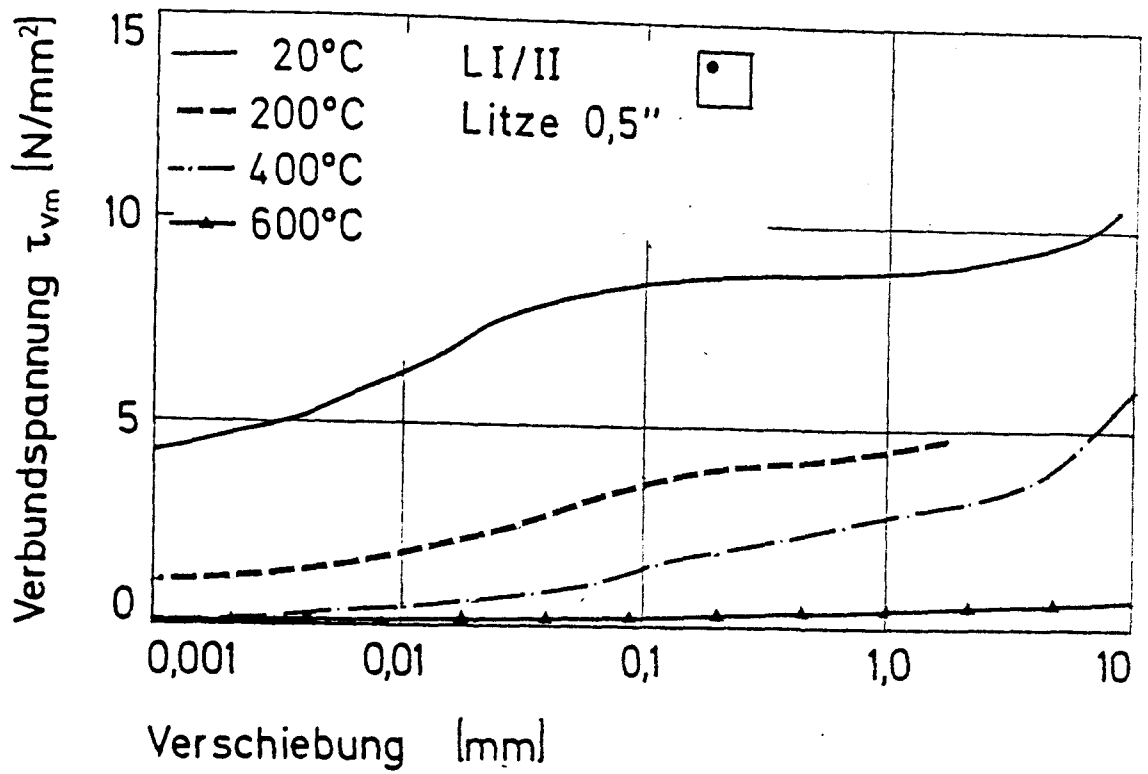


Bild 5.9: Verbundgesetze für hohe Temperaturen  
 von Litze  $\varnothing$  0,5" (12,5 mm)

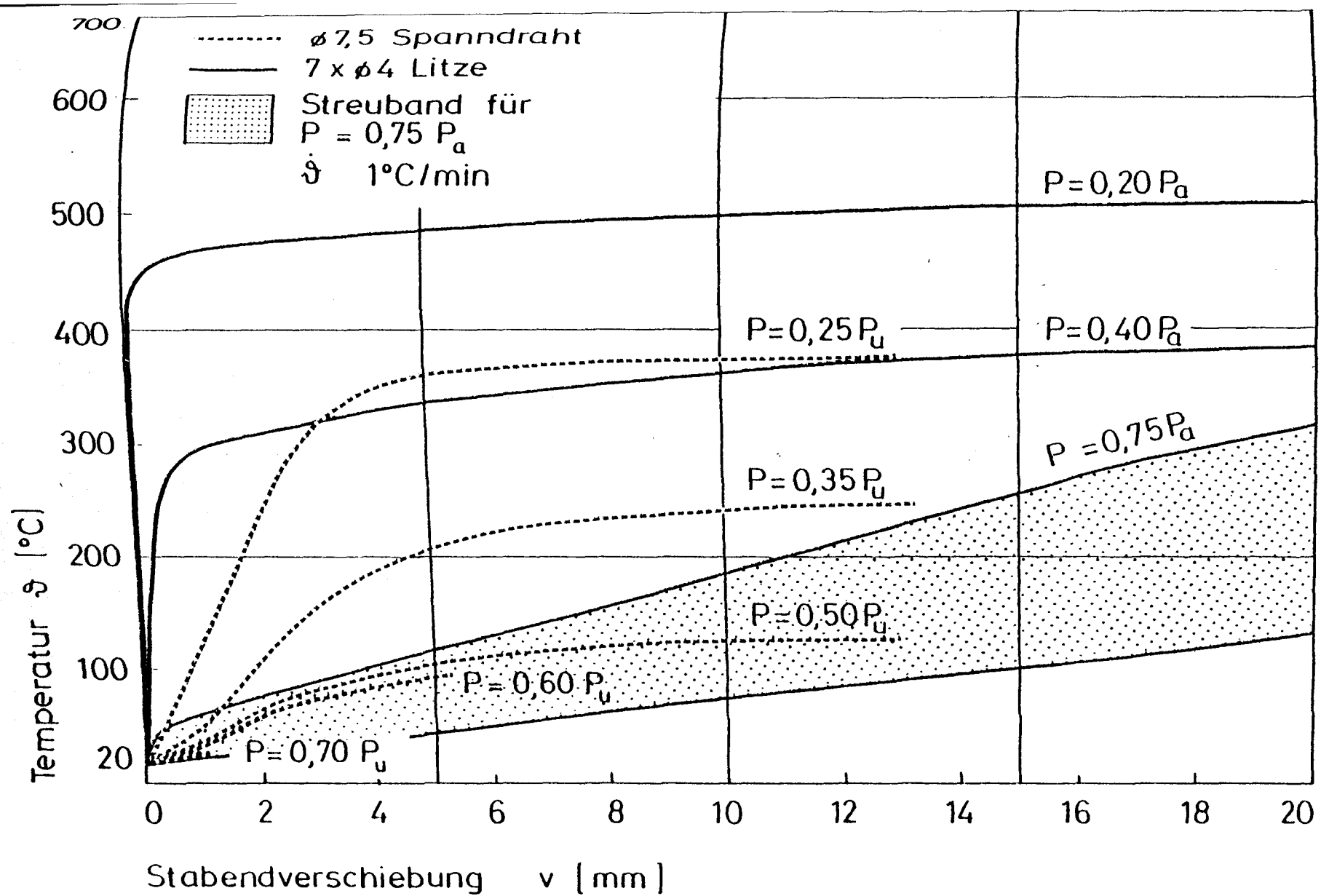
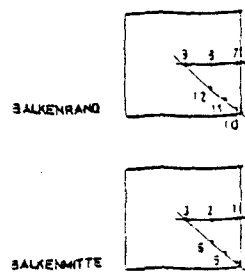
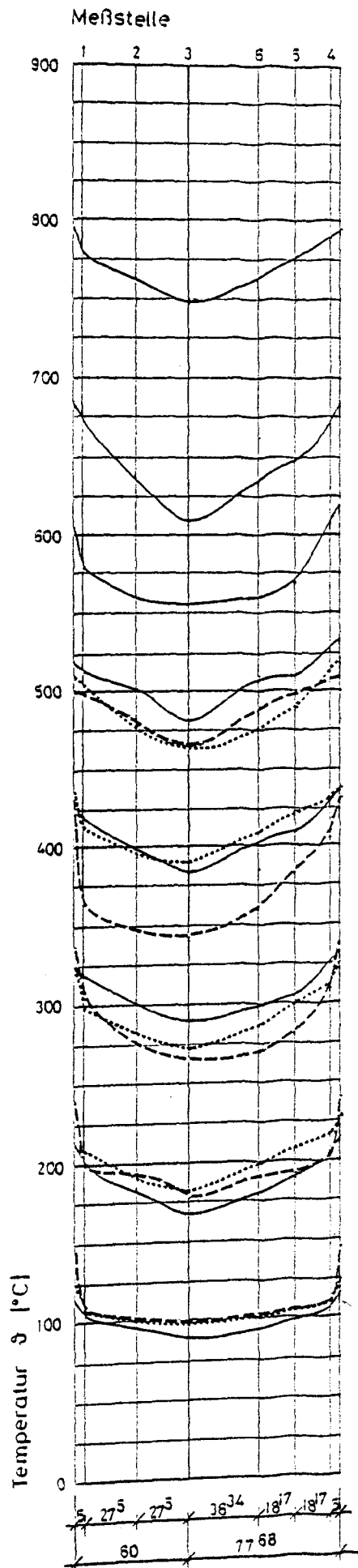
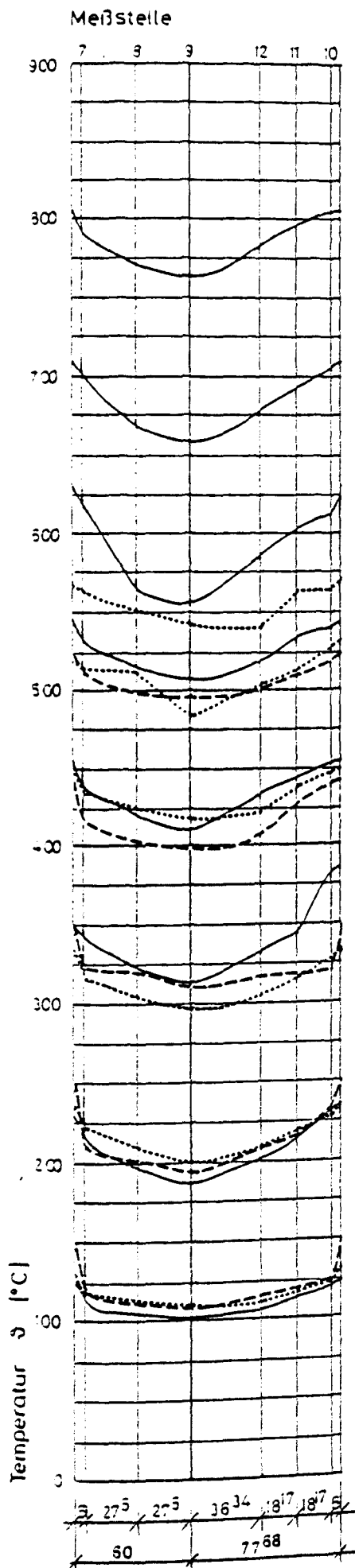


Bild 5.10: Verbundkriechen unter linear ansteigenden Temperaturen für Litze und Spanndraht



— 0 1,0  
 - - - 0 1,2  
 ... 0 1,3

Bild 5.11: Temperaturverteilung über den Querschnitt in Temperaturschritten von DI (Anordnung der Thermoelementgabel in Bild 3.1)

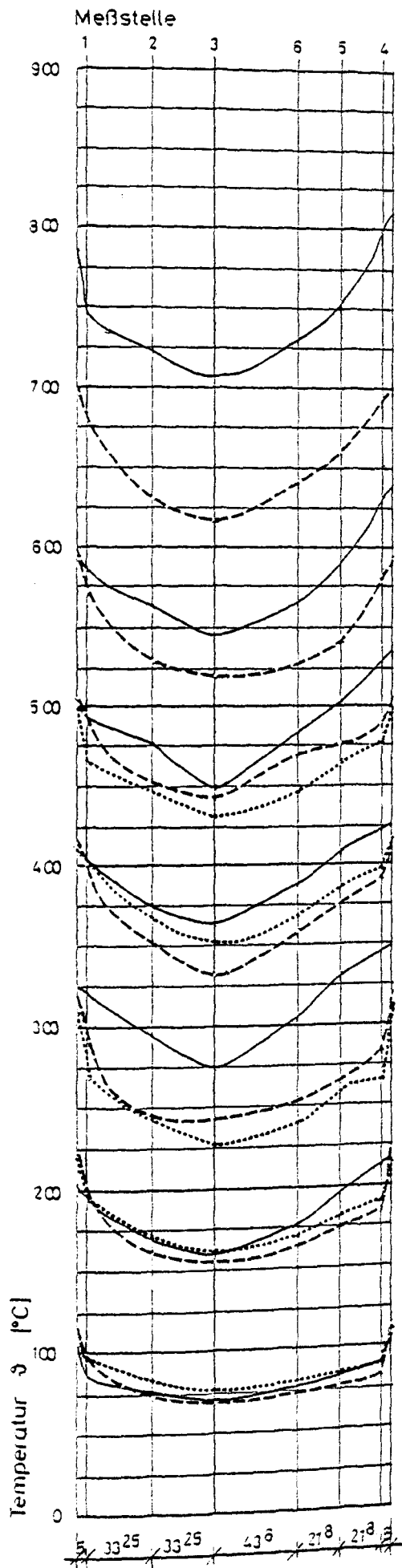
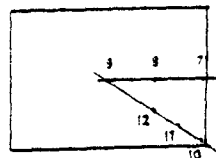
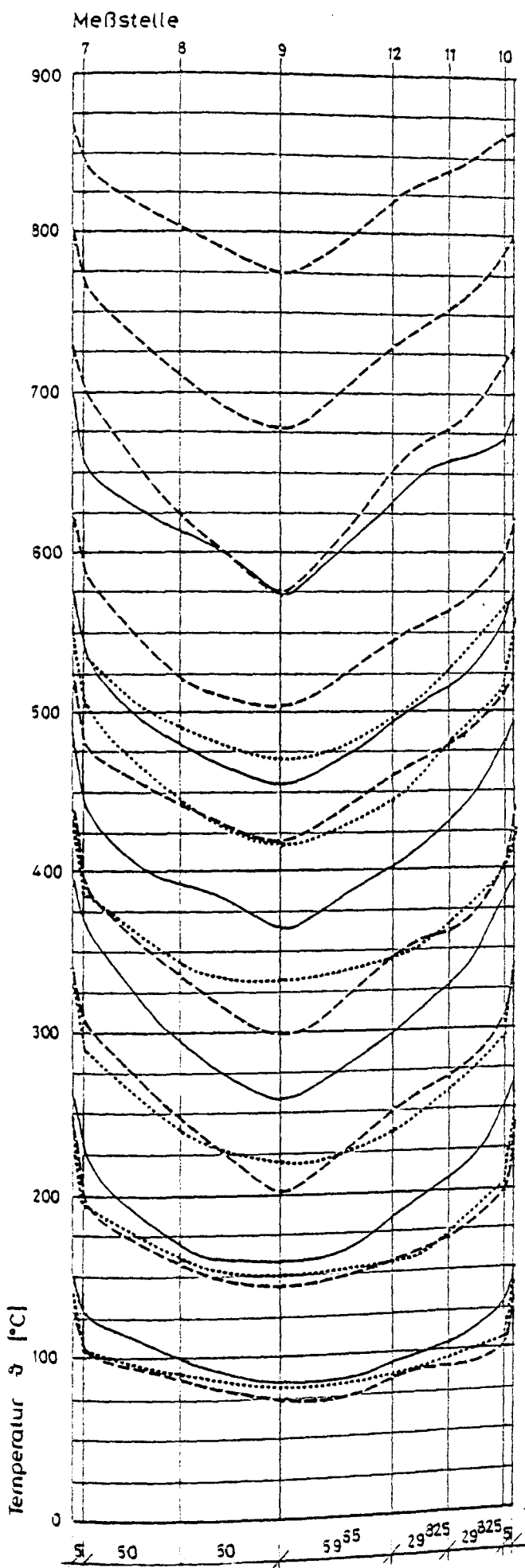
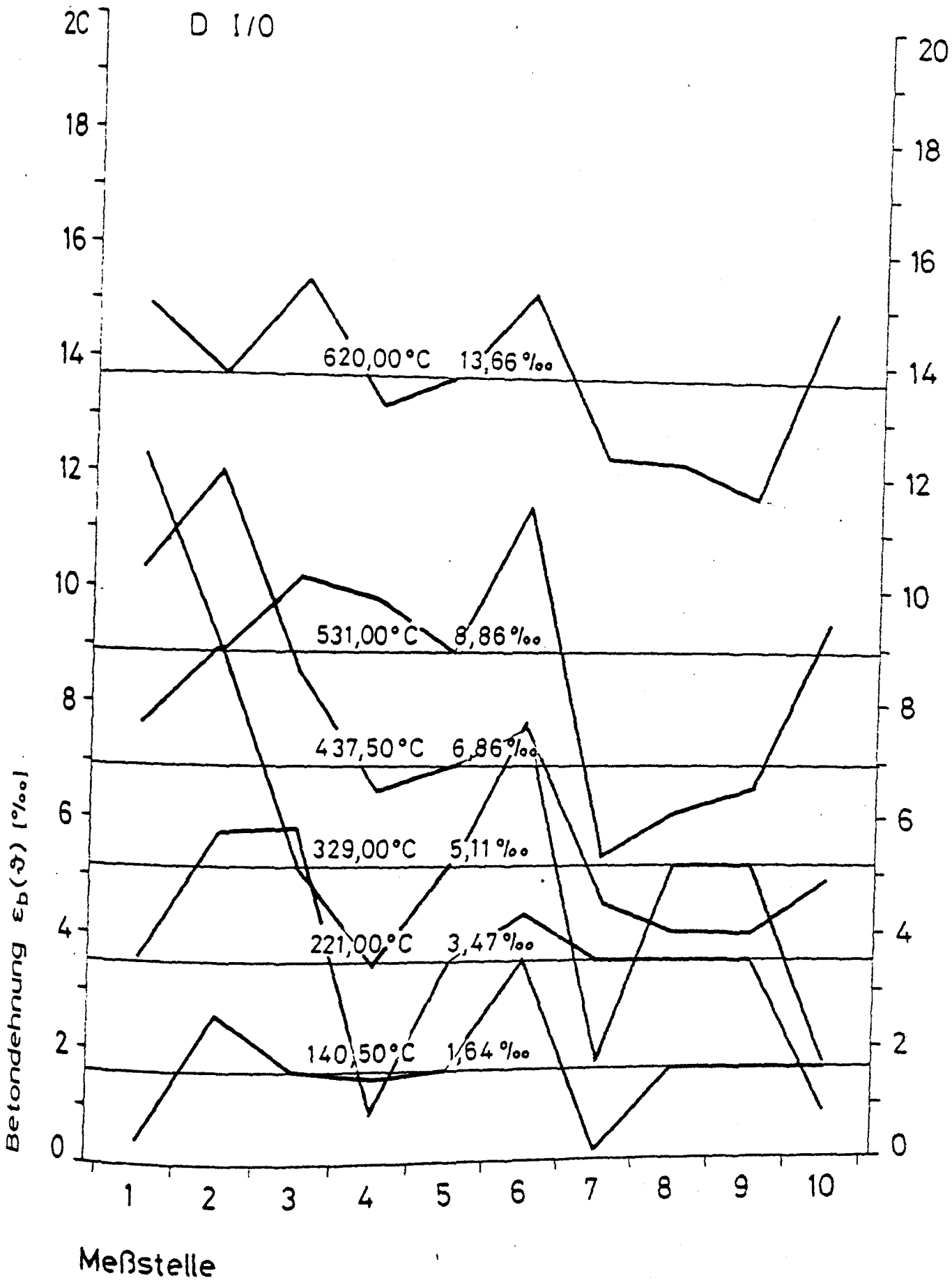


Bild 5.12: Temperaturverteilung über den Querschnitt in Temperaturschritten von DIII (Anordnung der Thermoelementgabel in Bild 3.1)



— L 0  
 - - L 1,1  
 ... L 1,2

Bild 5.13: Temperaturverteilung den Querschnitt in Temperaturschritten von LI (Anordnung der Thermoelementgabel in Bild 3.1)



5.14: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/O

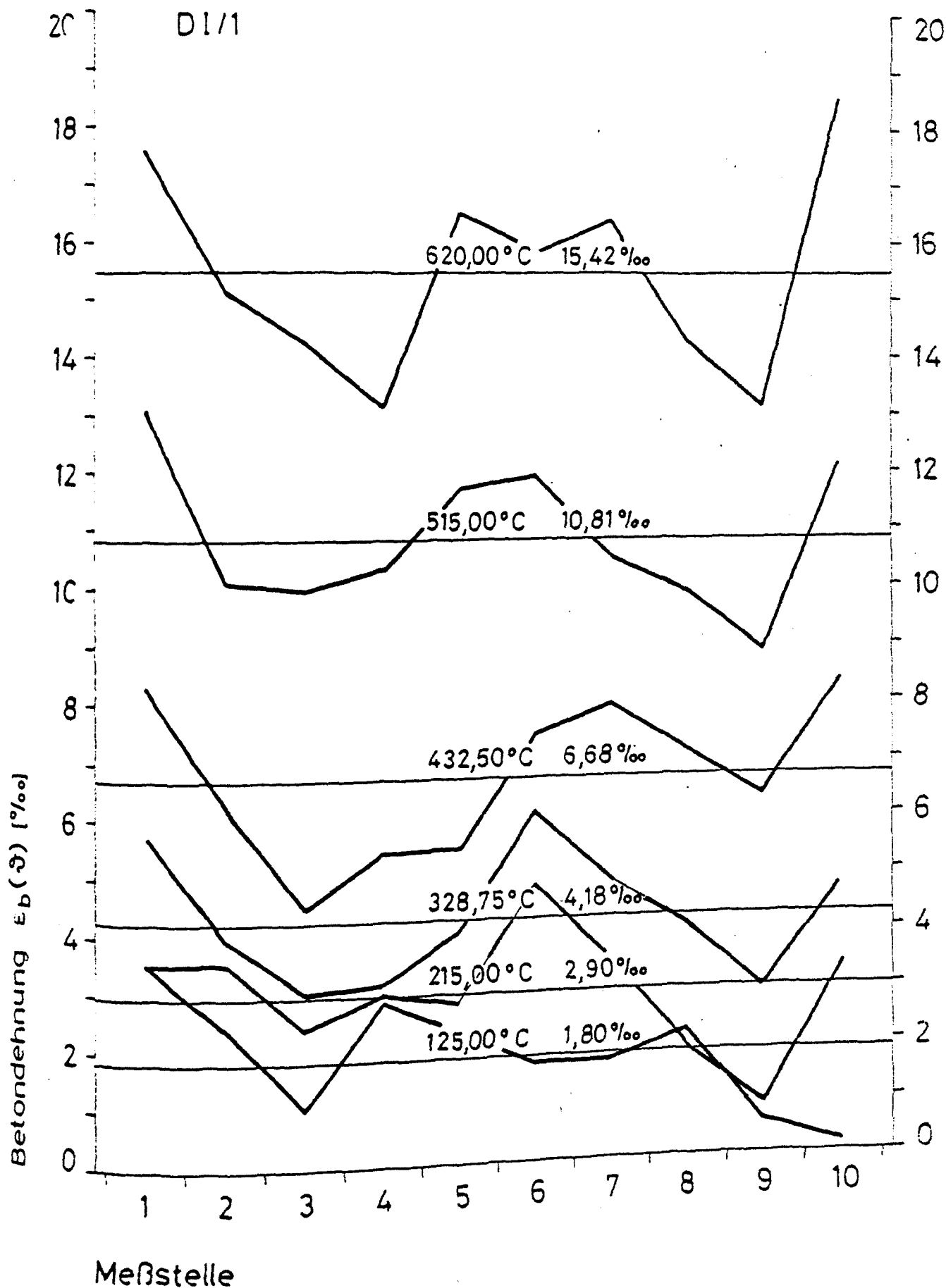
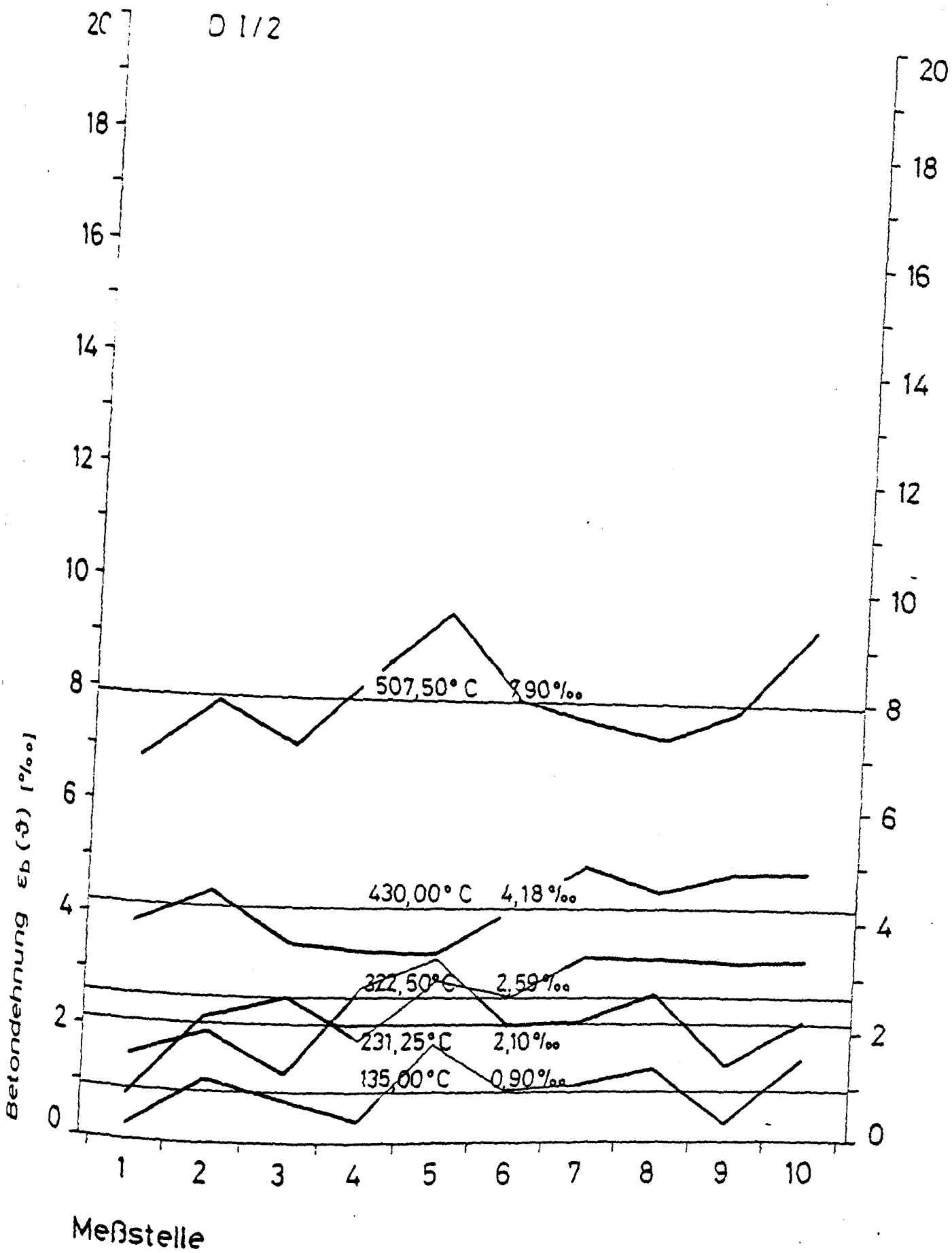
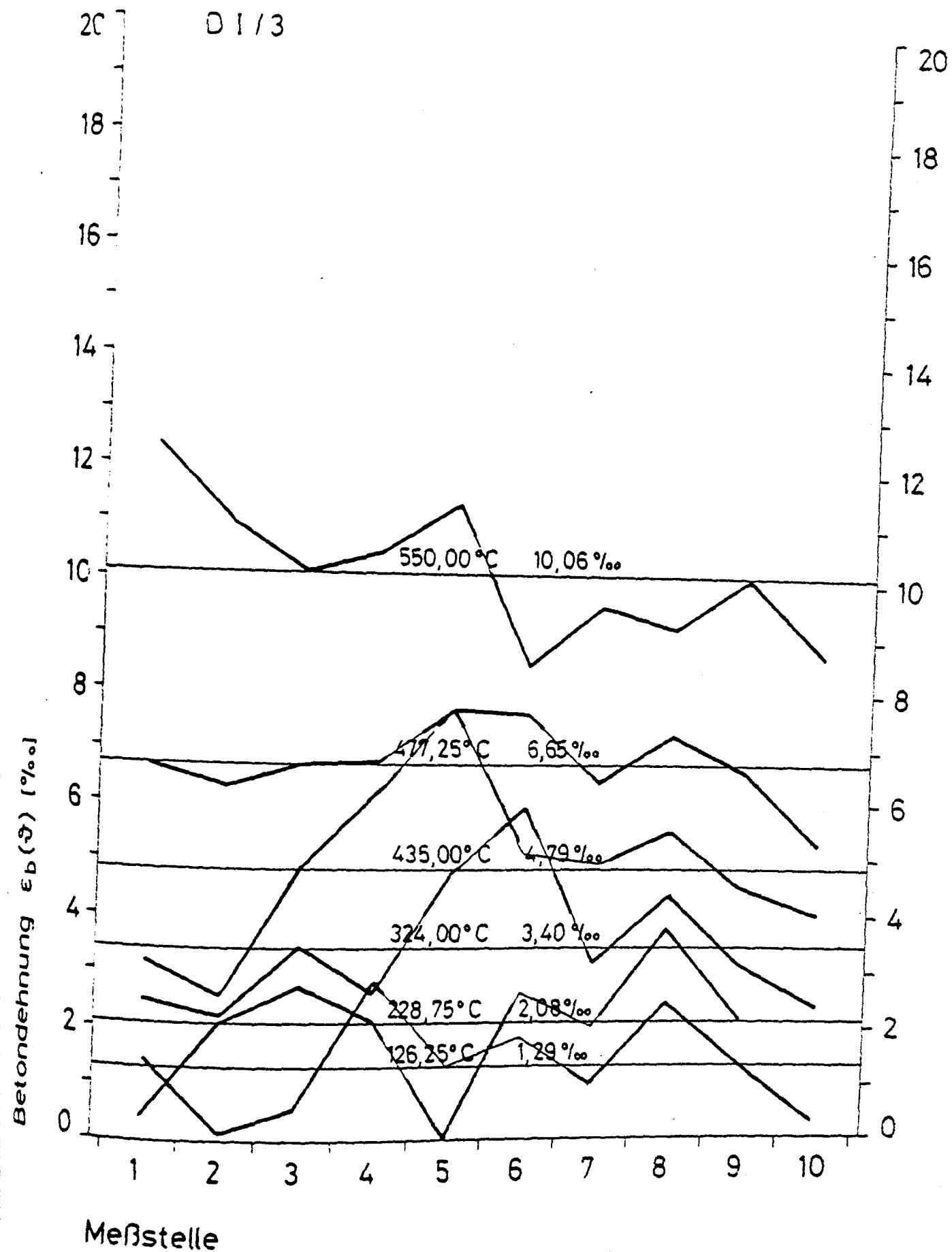


Abbildung 5.15: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/1

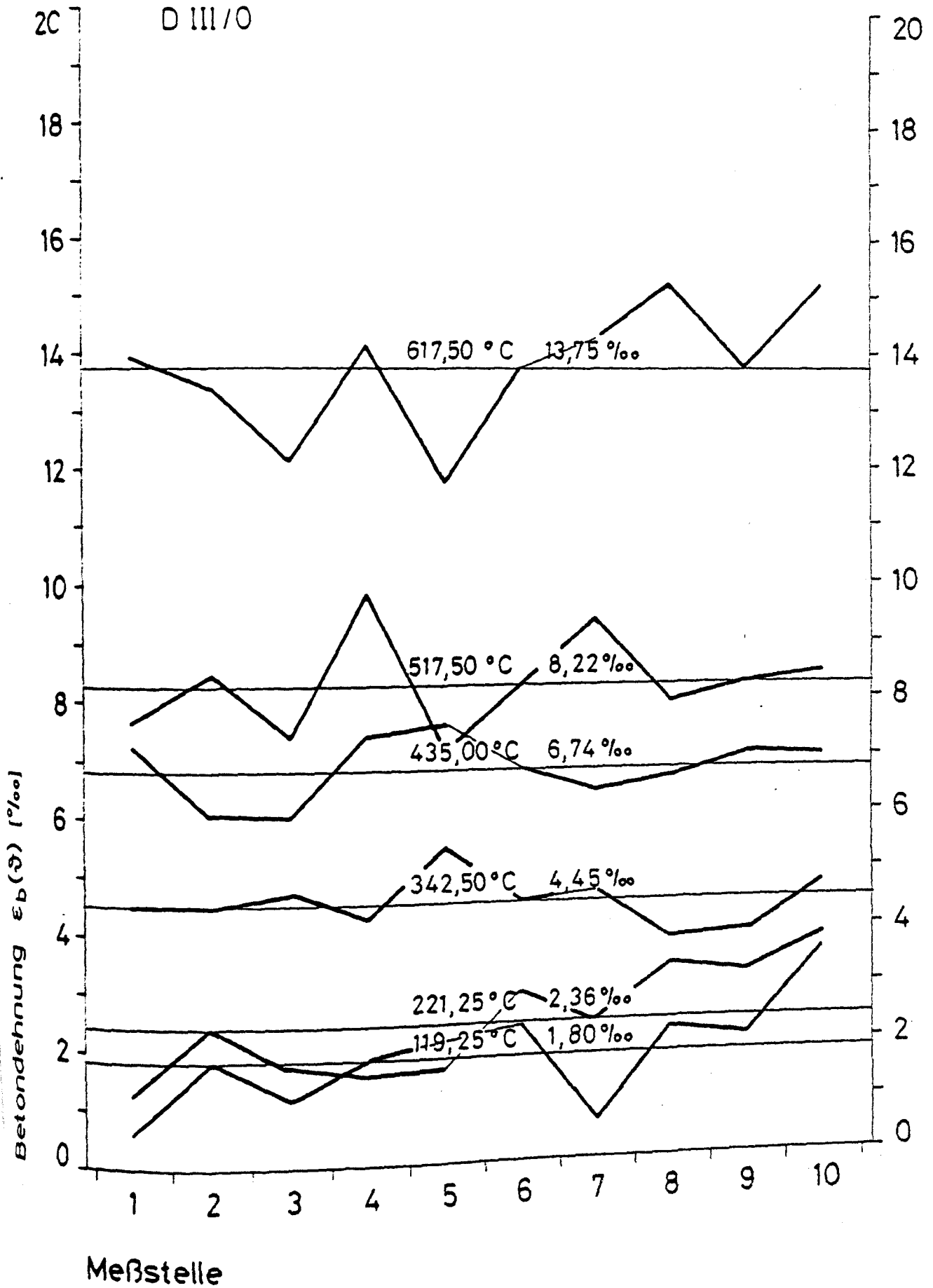


S. 16: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/2

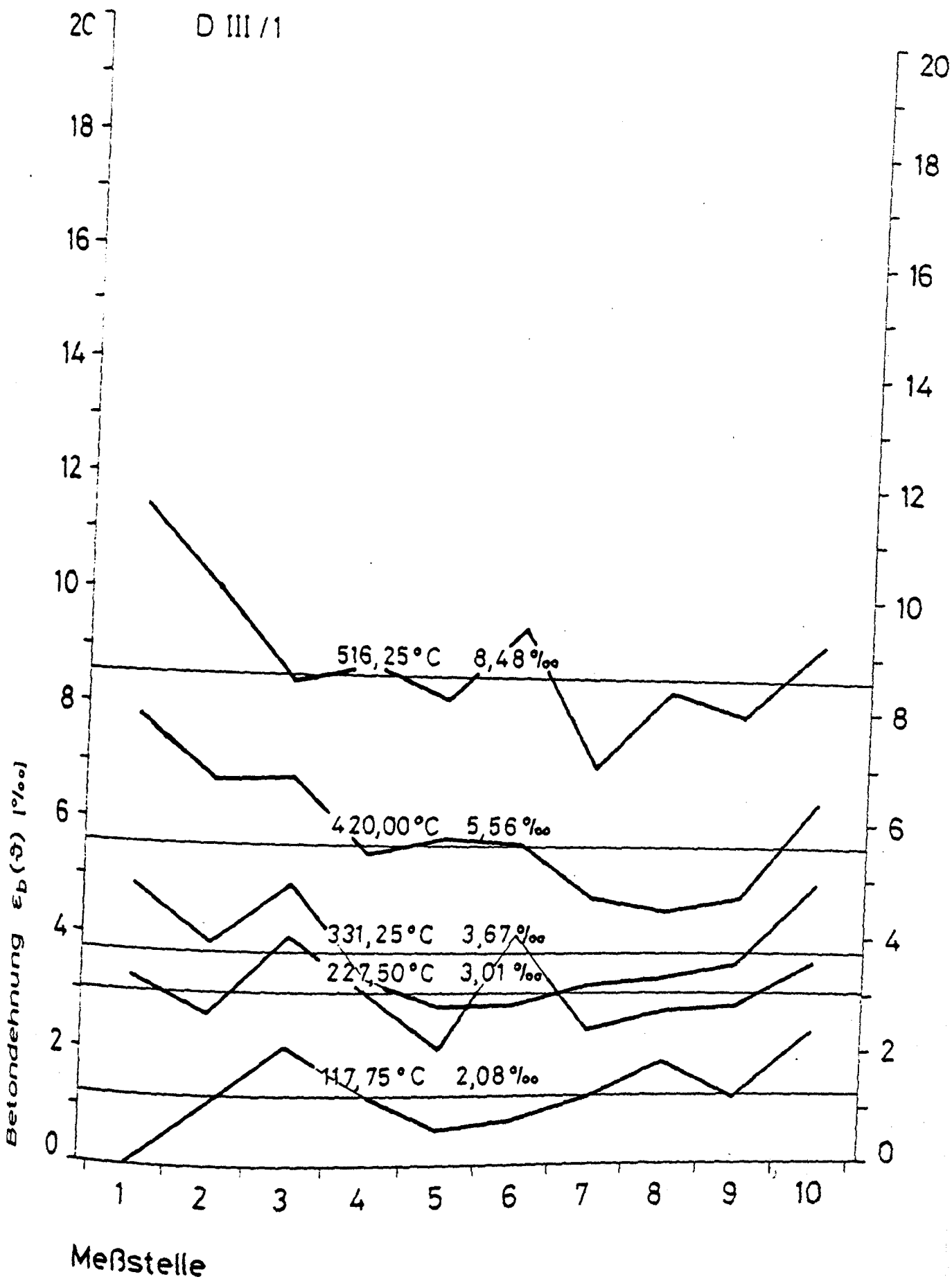




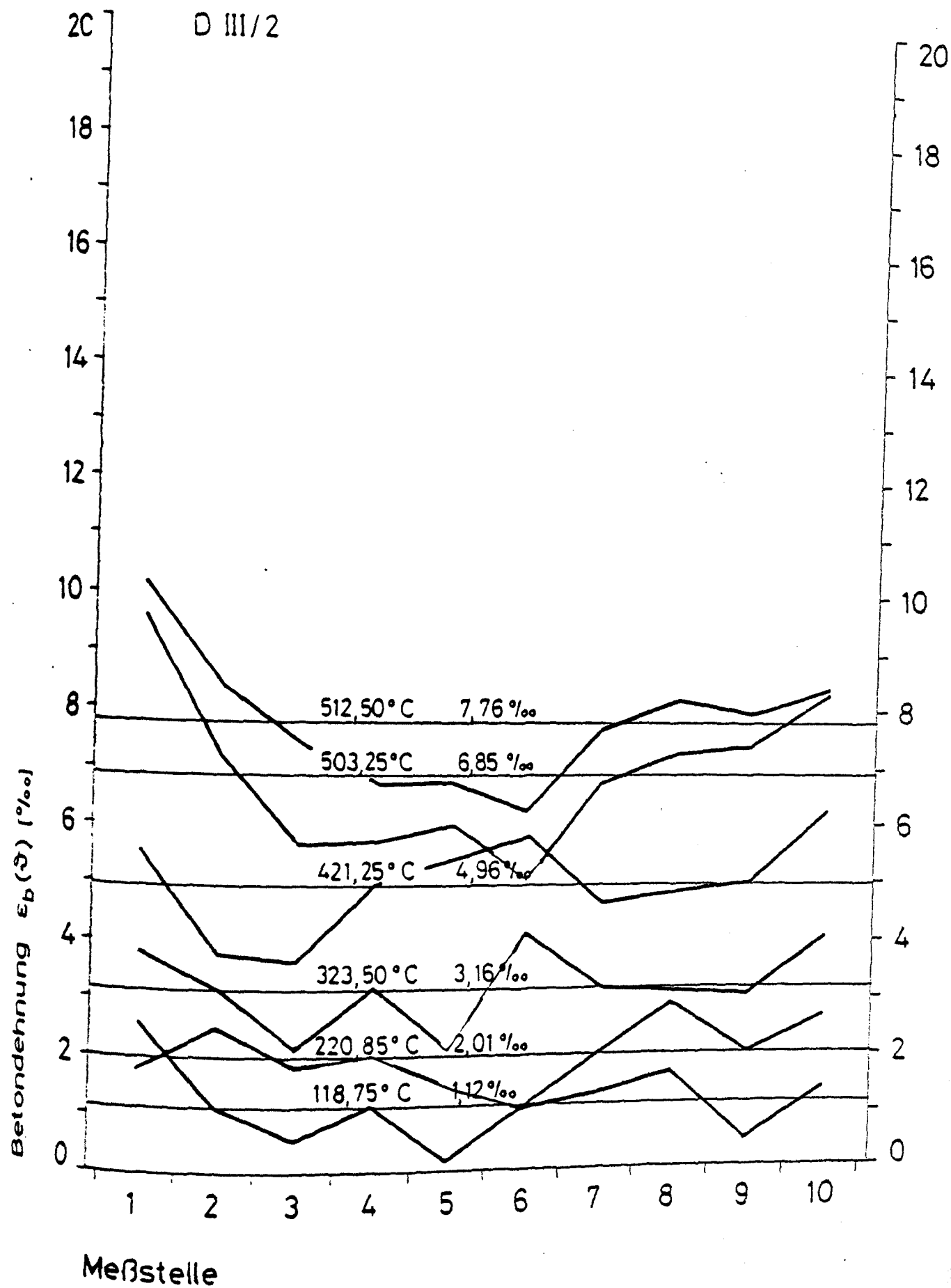
5.17: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DI/3



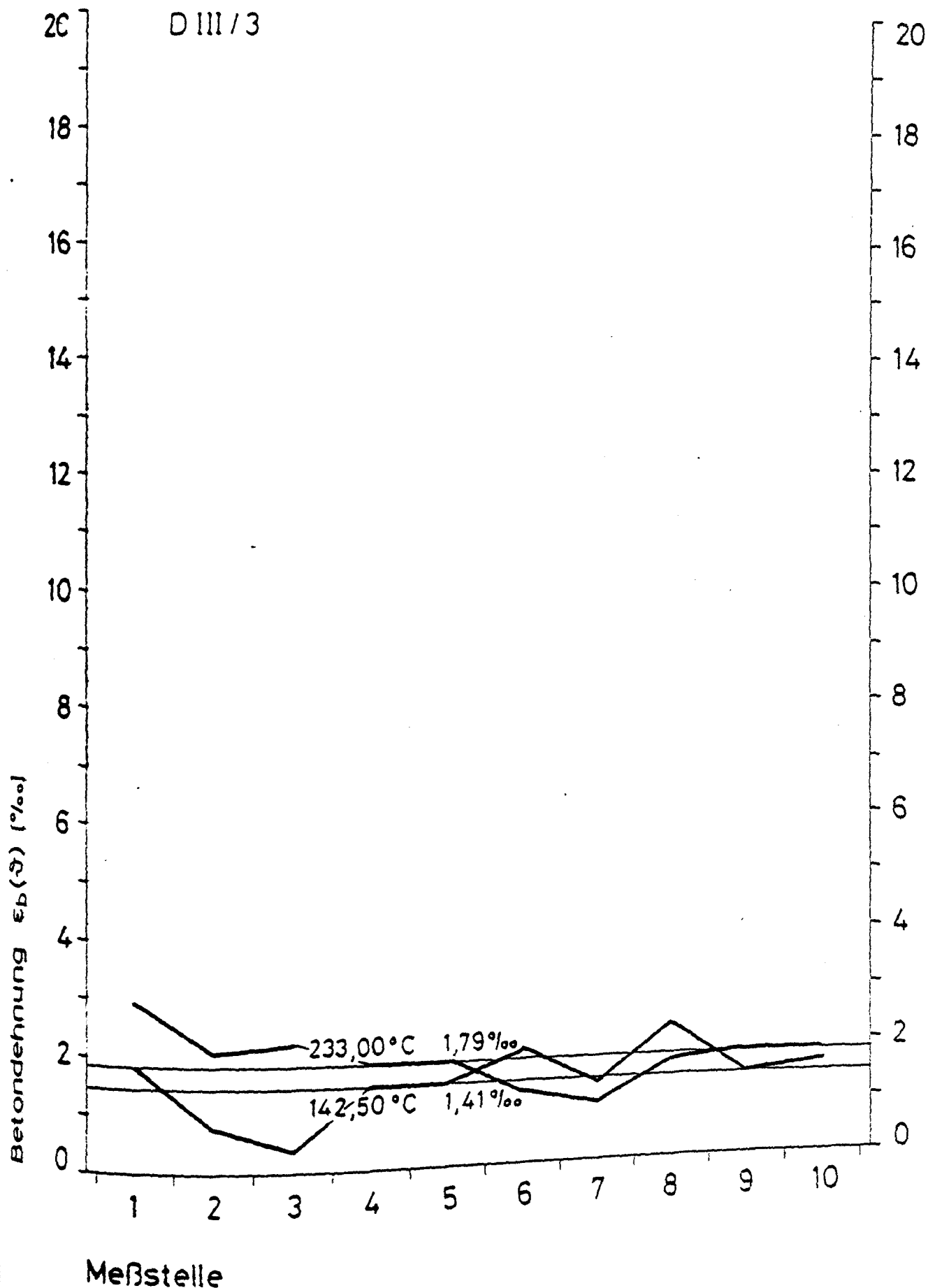
5.18: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/0



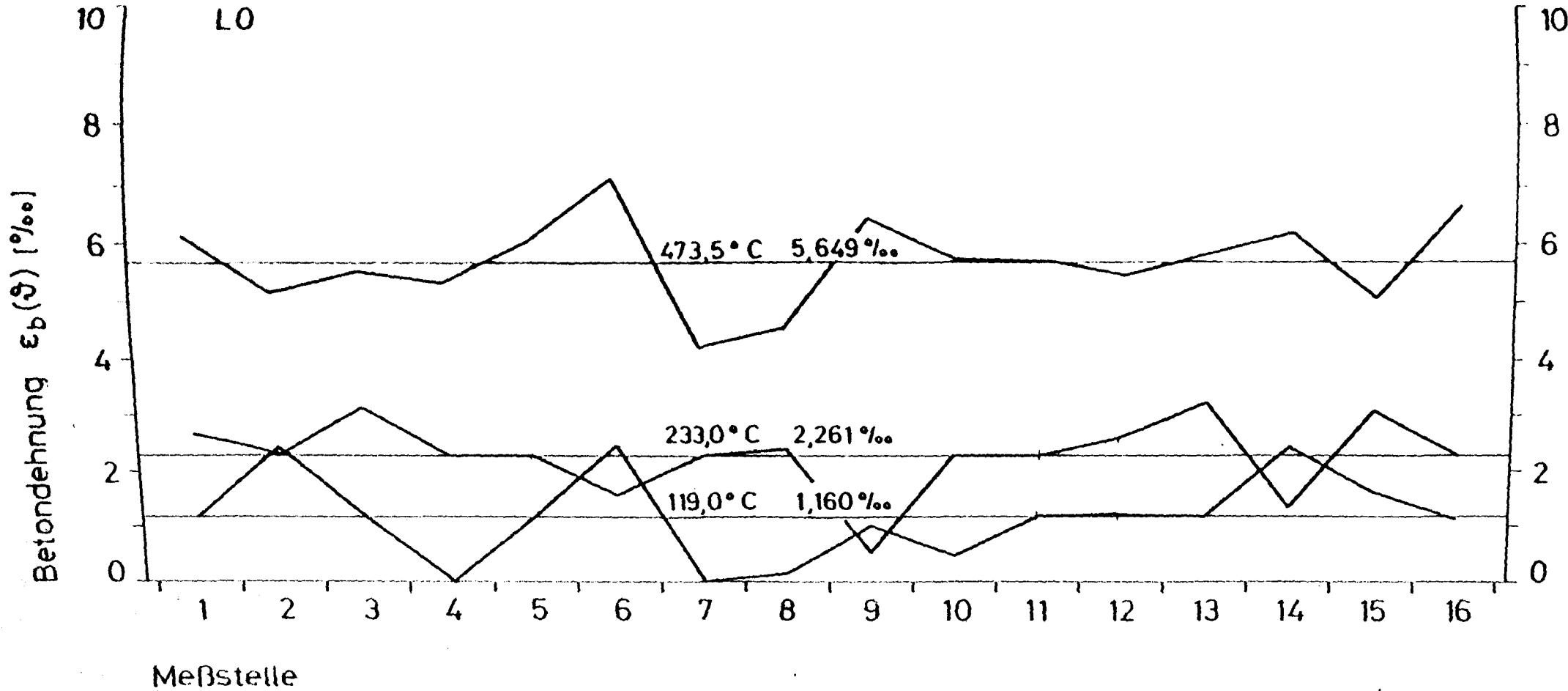
15.19: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/1



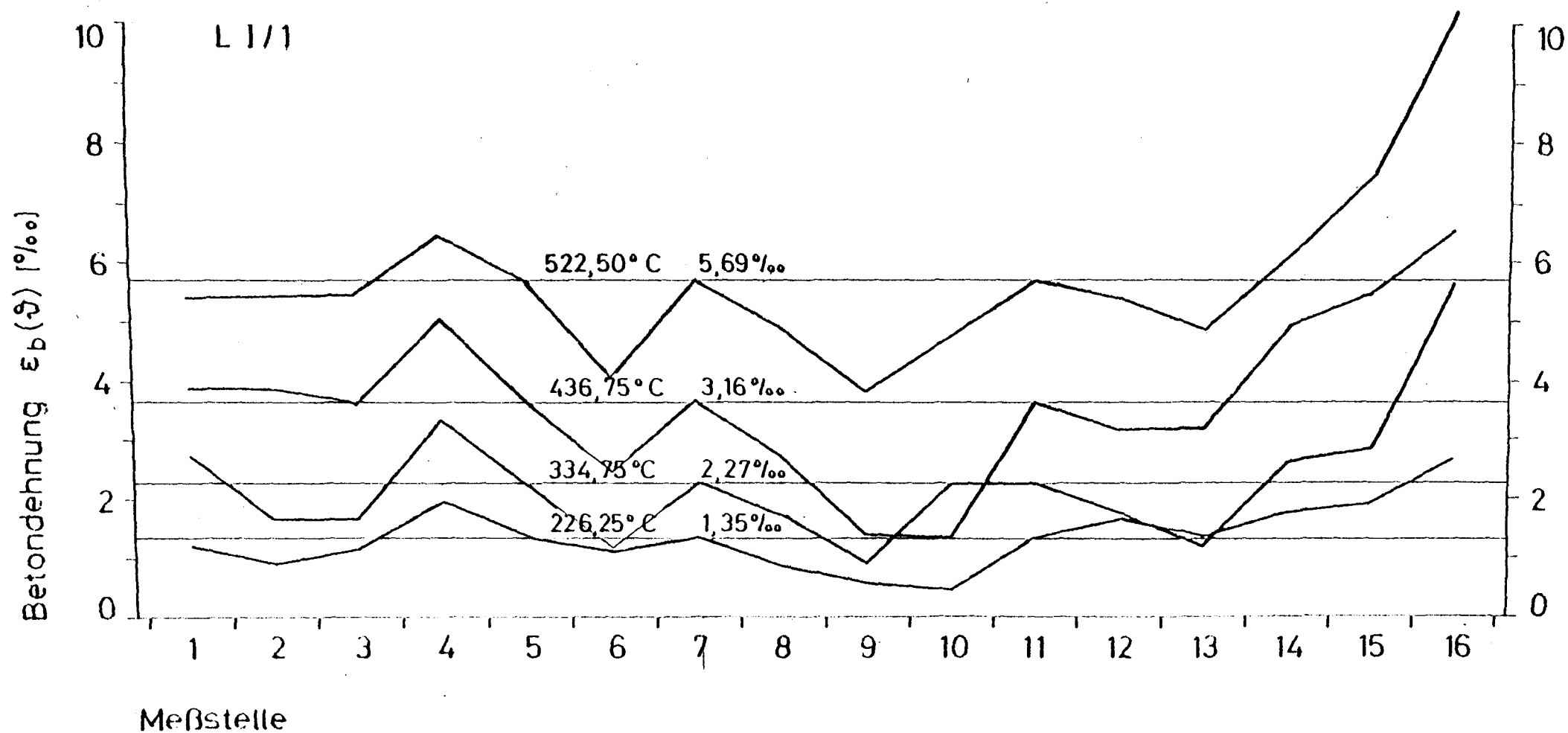
5.20: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/2



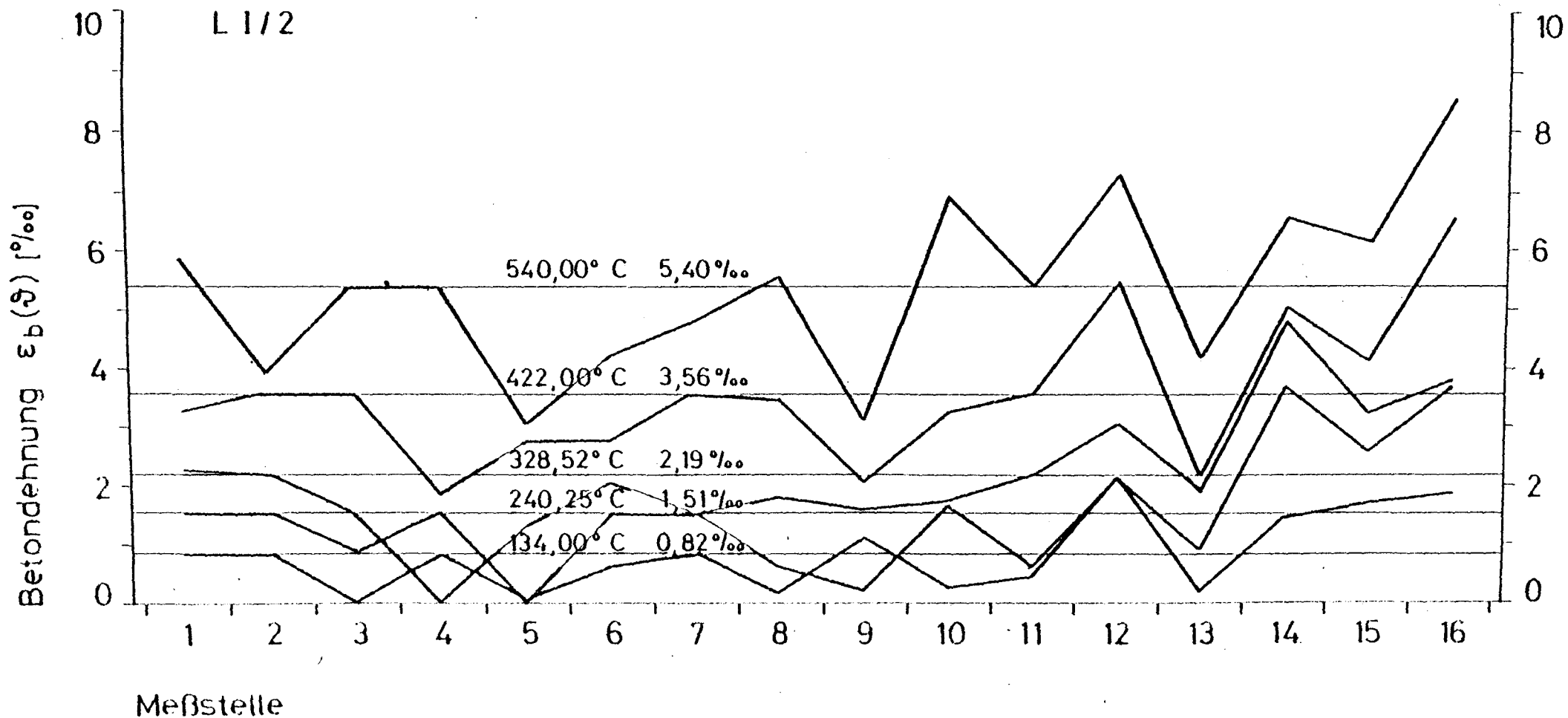
5.21: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von DIII/3



**Bild 5.22:** Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von LO

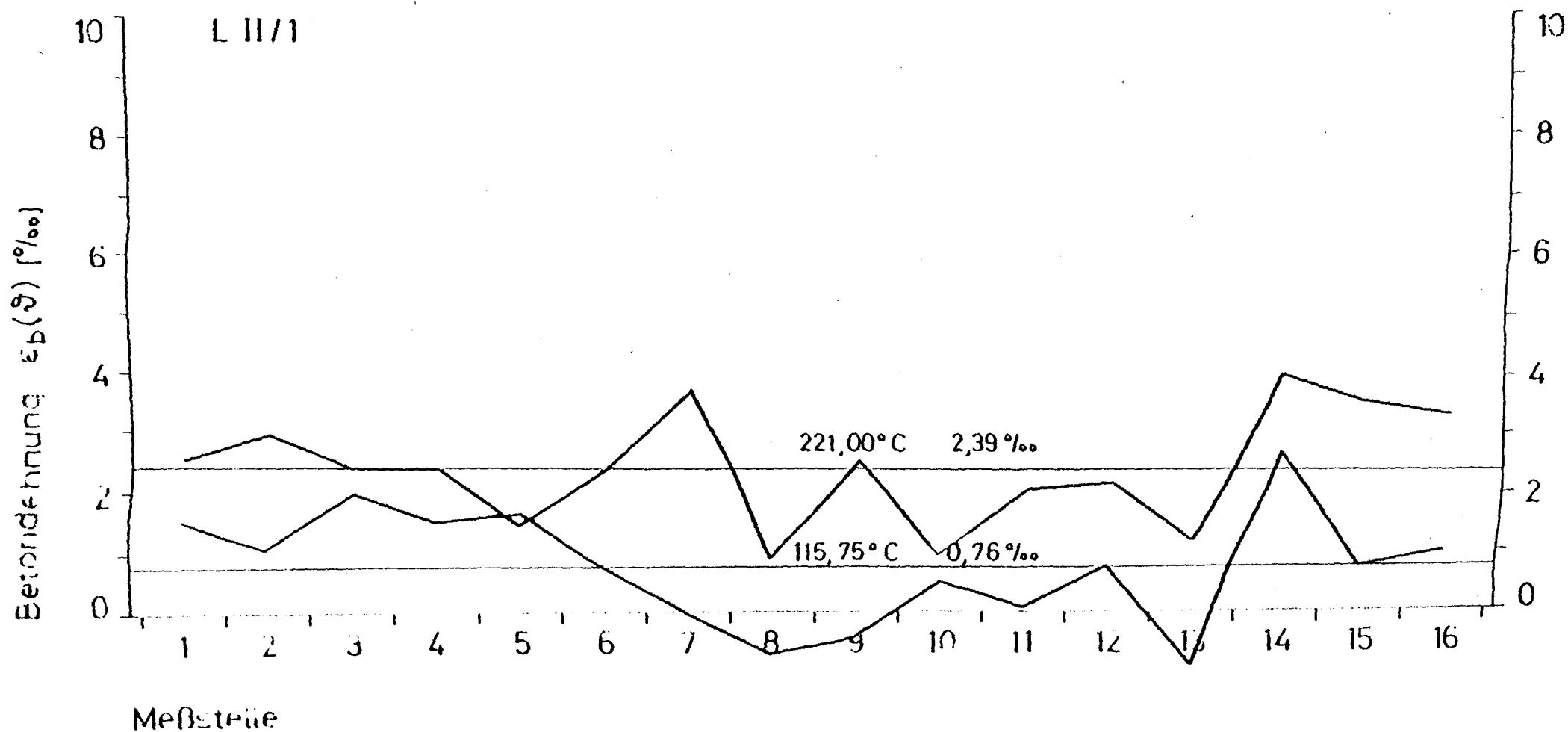


**Bild 5.23:** Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von L1/1



**Bild 5.24:** Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von LI/2





**Bild 5.25:** Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von LII/1

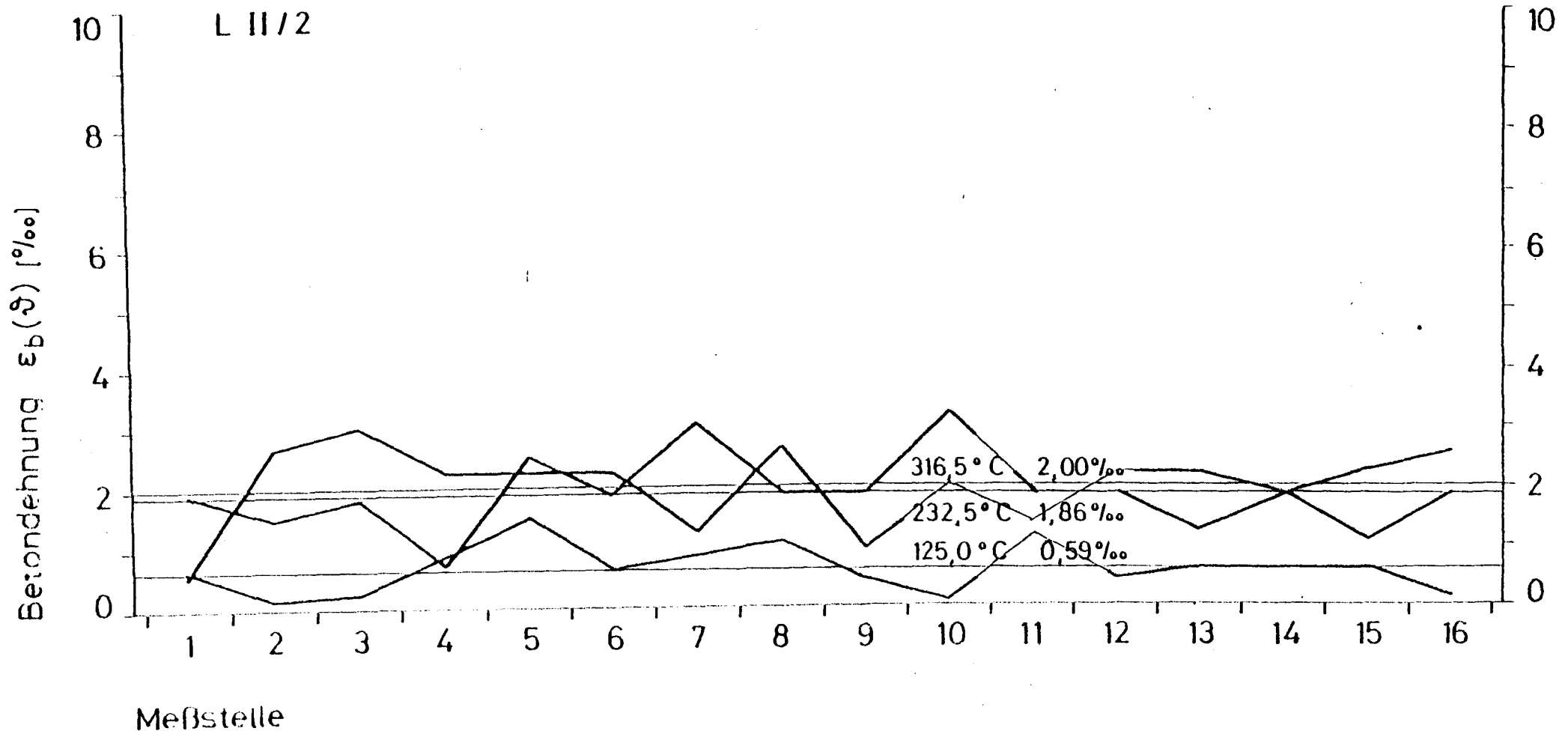
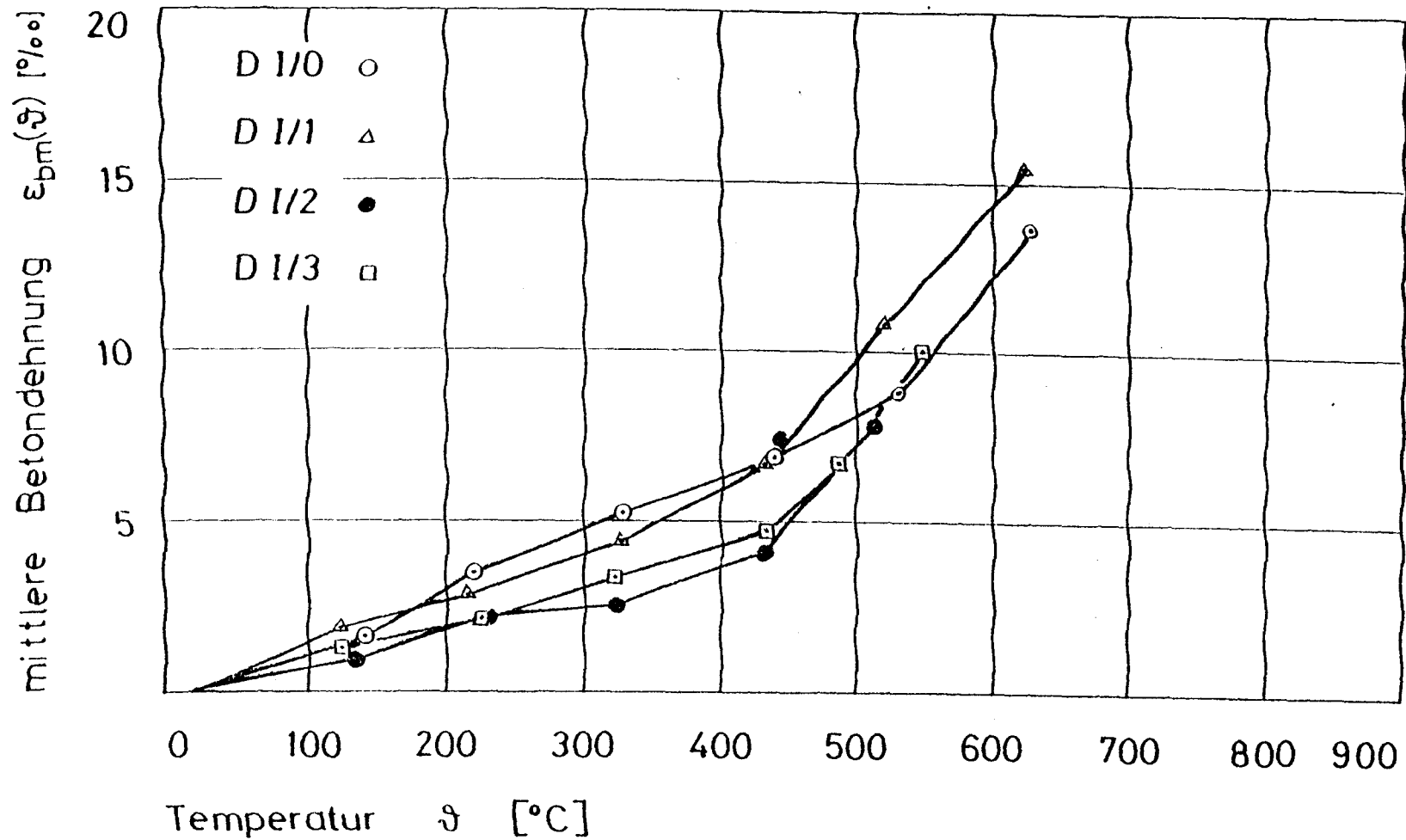
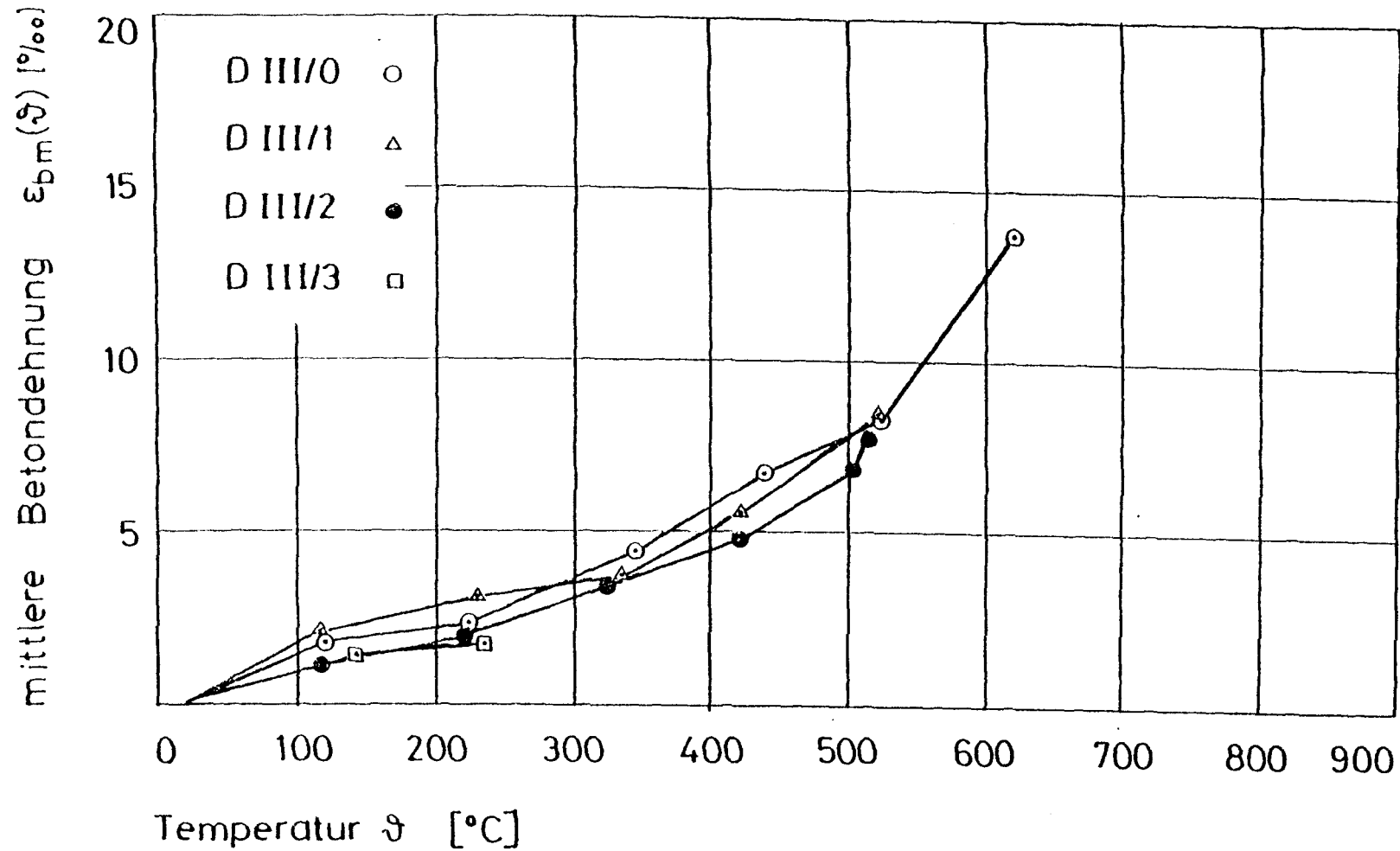


Bild 5.26: Temperaturabhängige Betondehnungen über die Balkenlänge und die sich daraus ergebenden mittleren Dehnungen von LII/2



**Bild 5.27:** Mittlere temperaturabhängige Betondehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie von DI



**Bild 5.28:** Mittlere temperaturabhängige Betondehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie von DIII

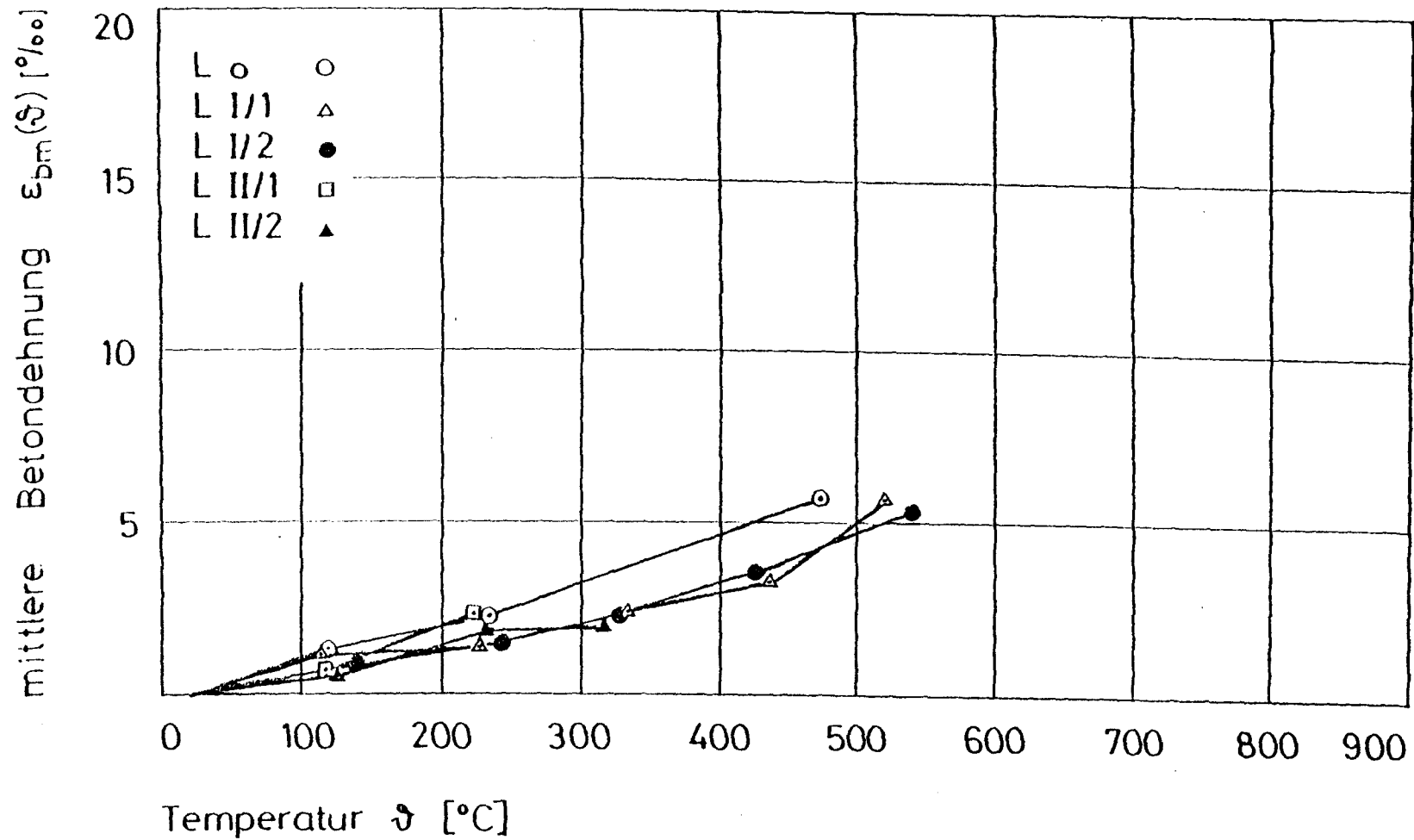


Bild 5.29: Mittlere temperaturabhängige Betondehnungen, gemessen über die Seitenmittellinie der L-Körper

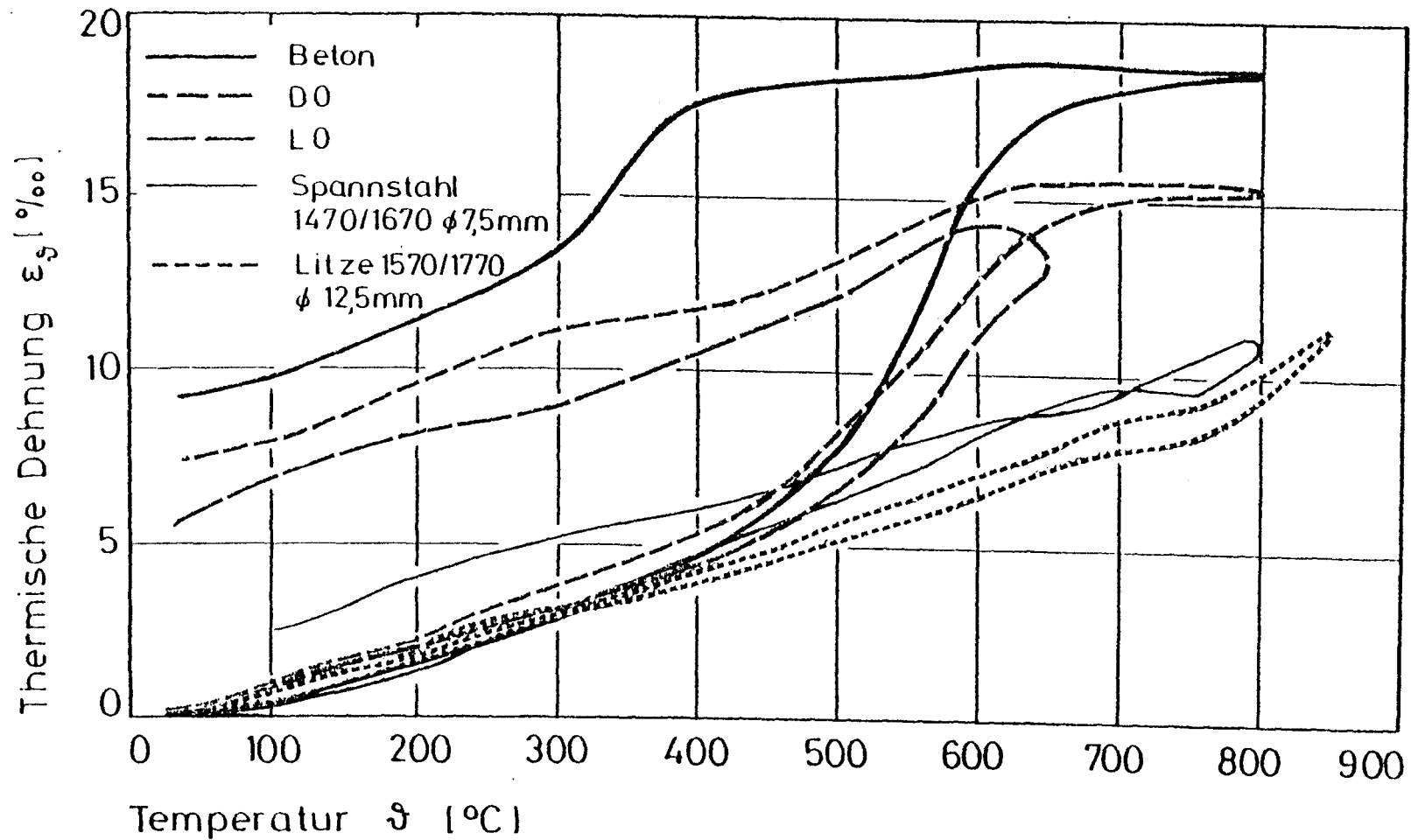


Bild 5.30: Thermische Dehnungen der Baustoffe Beton, Spannstahl und Litze sowie der nicht vorgespannten Versuchskörper

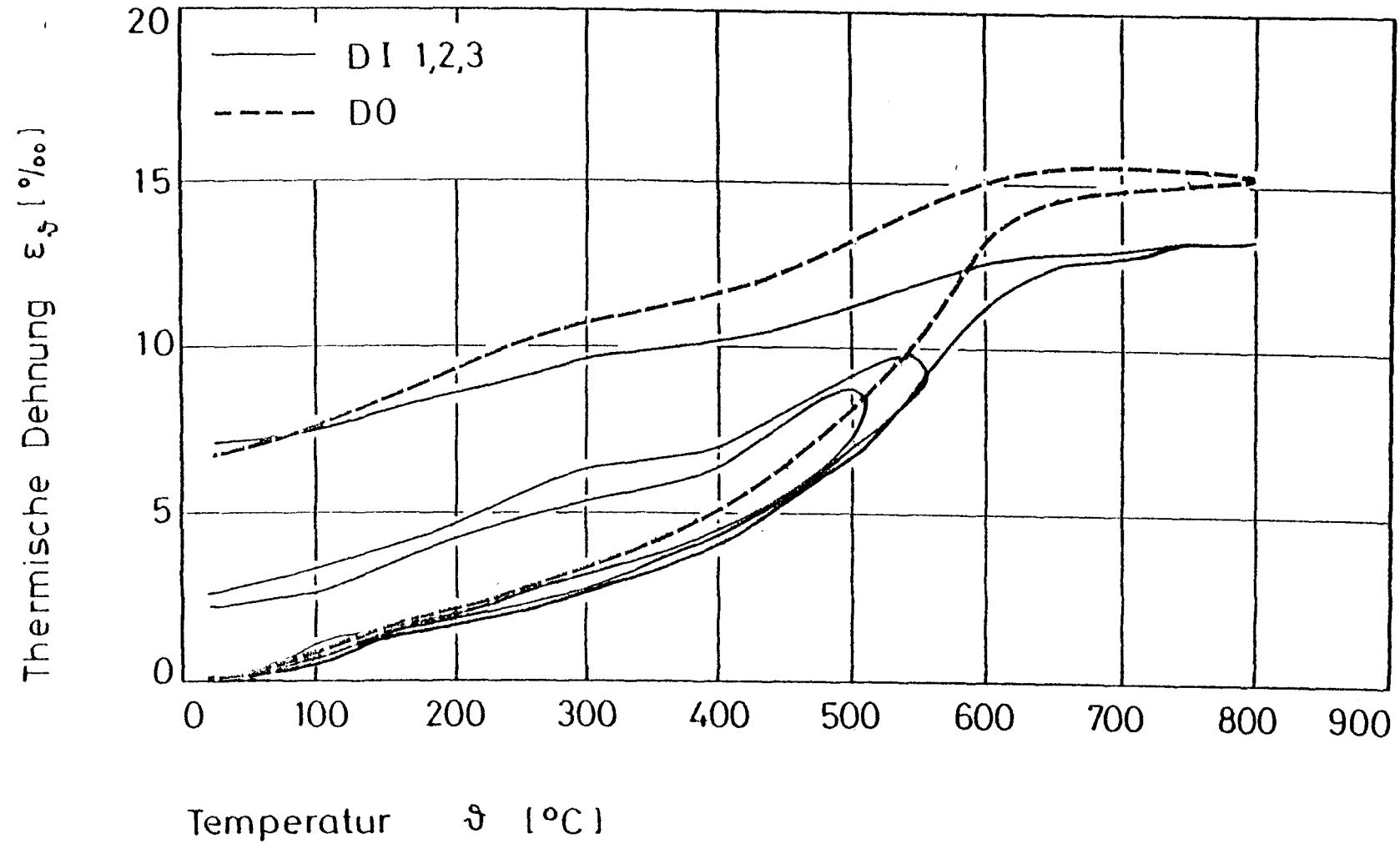


Bild 5.31: Thermische Dehnungen der Versuchskörper - DI

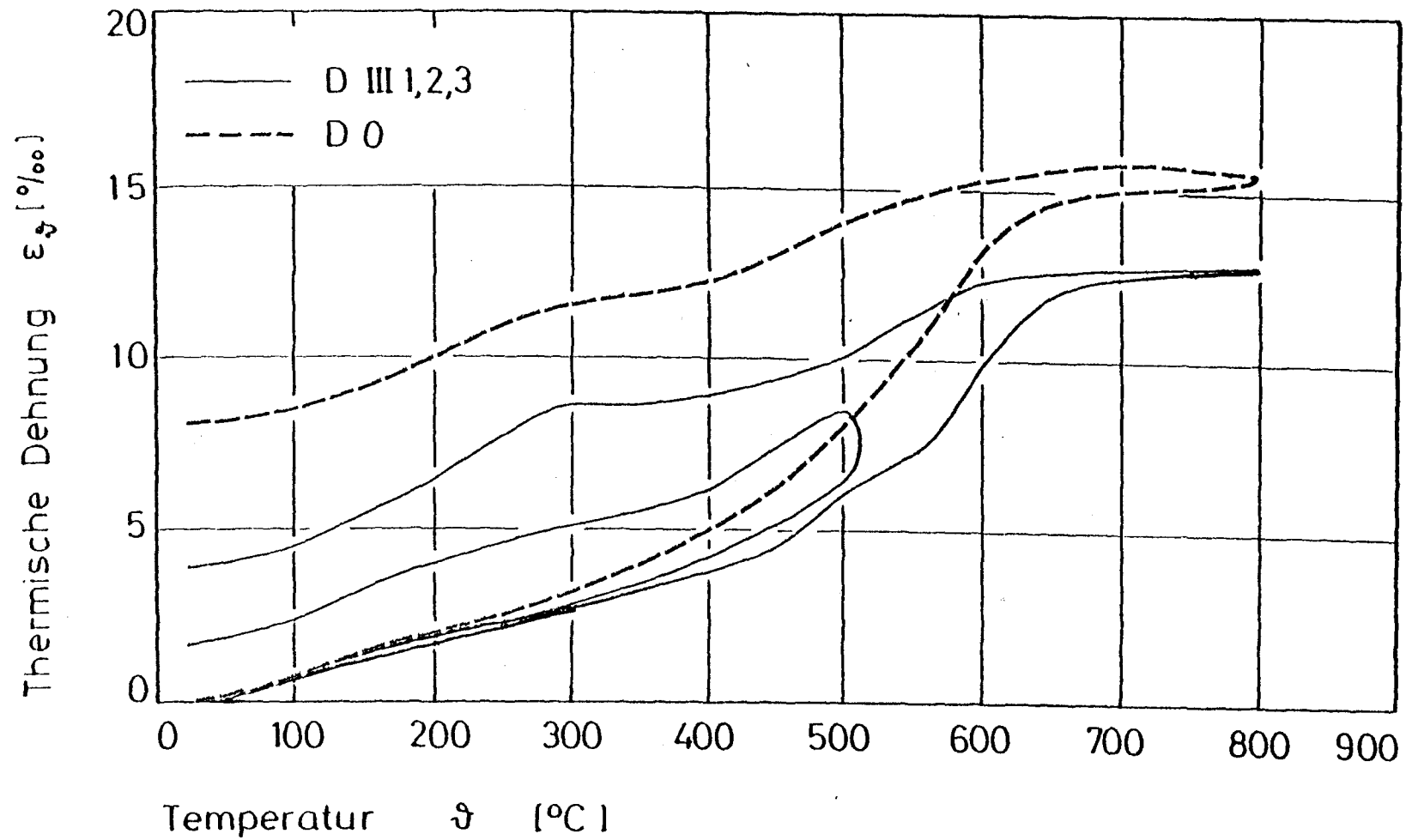


Bild 5.32: Thermische Dehnungen der Versuchskörper - DIII



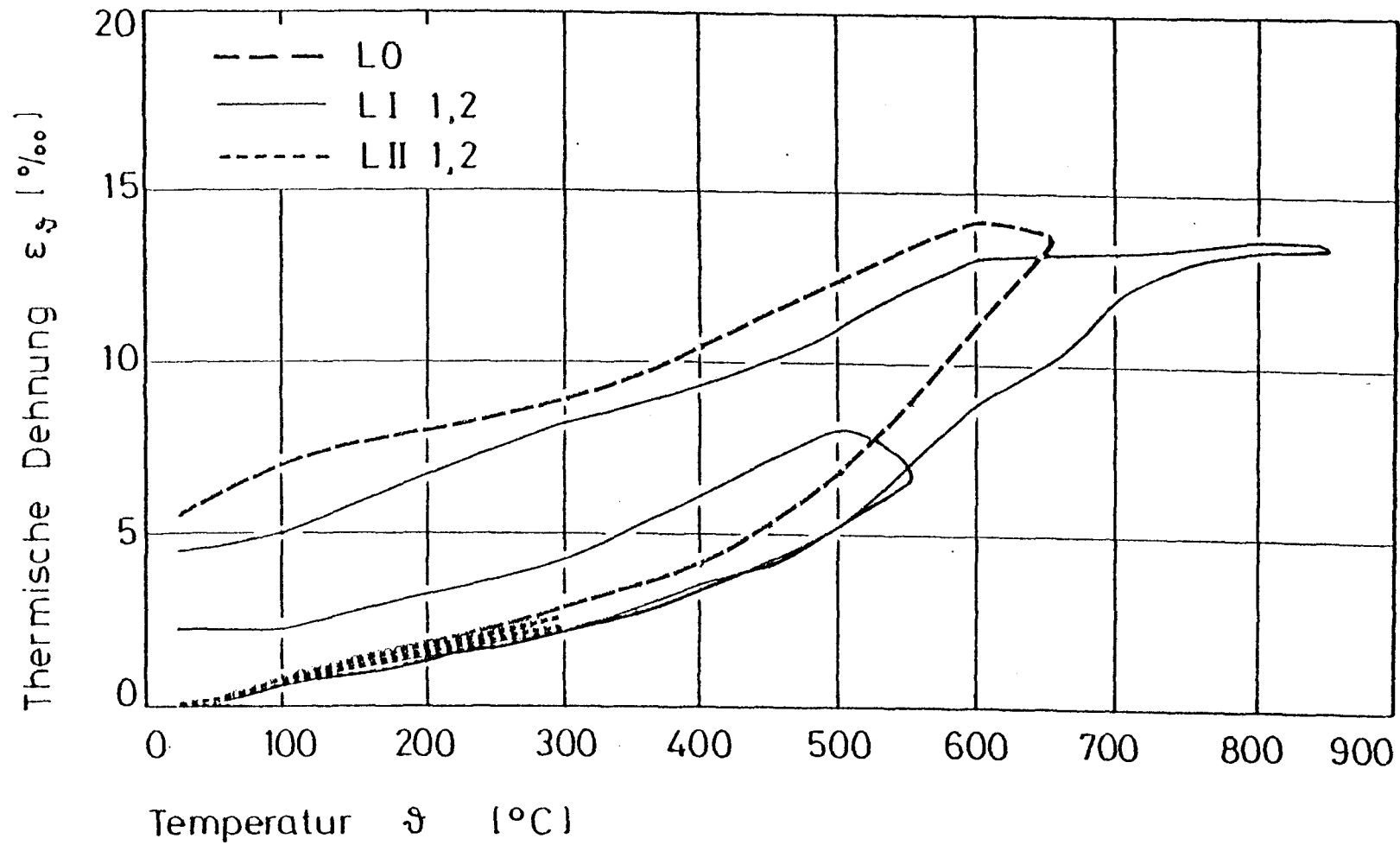


Bild 5.33: Thermische Dehnungen der Versuchskörper - L

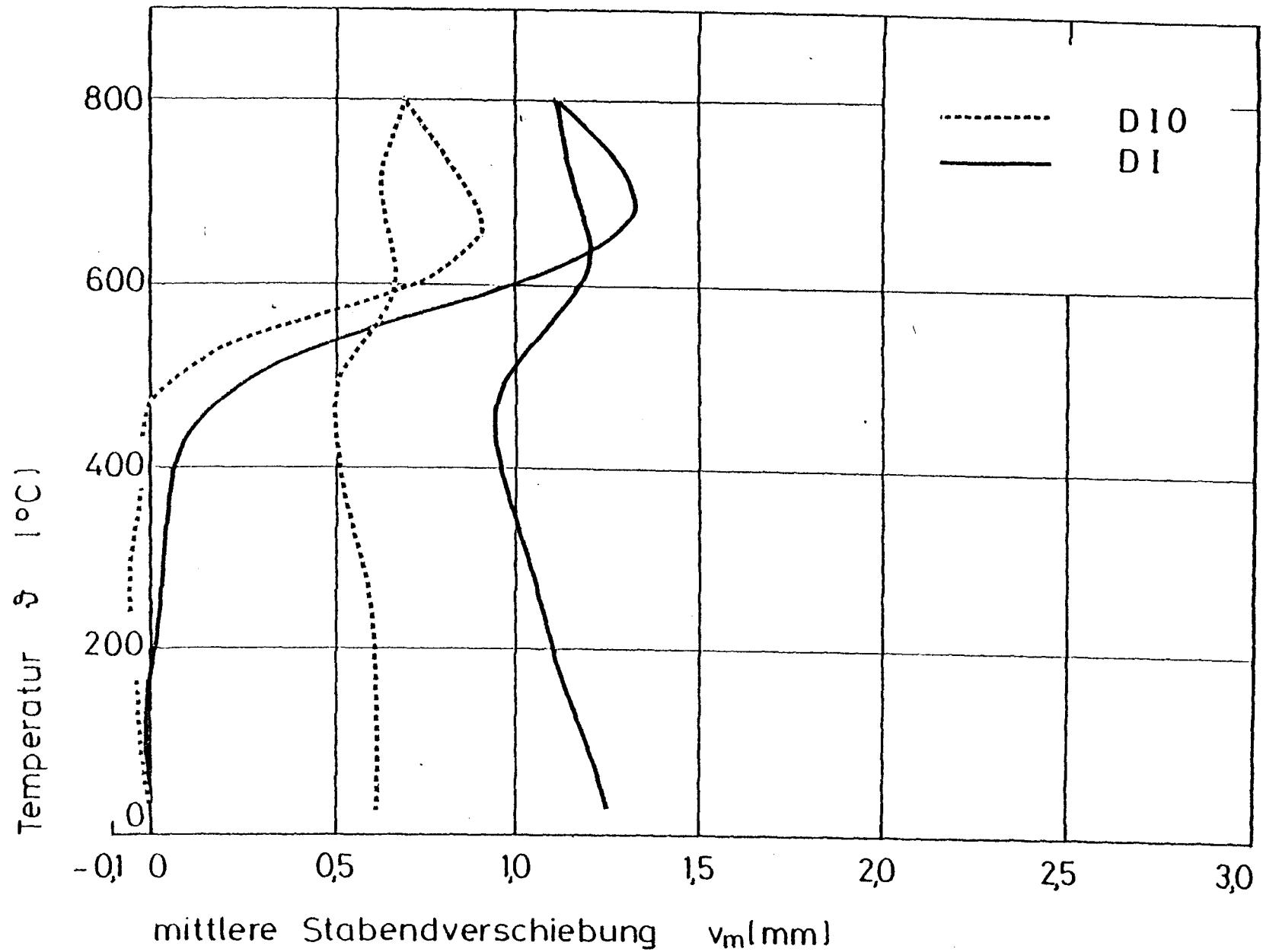


Bild 5.34: Mittlere temperaturabhängige Stabendverschiebungen der DI-Körper

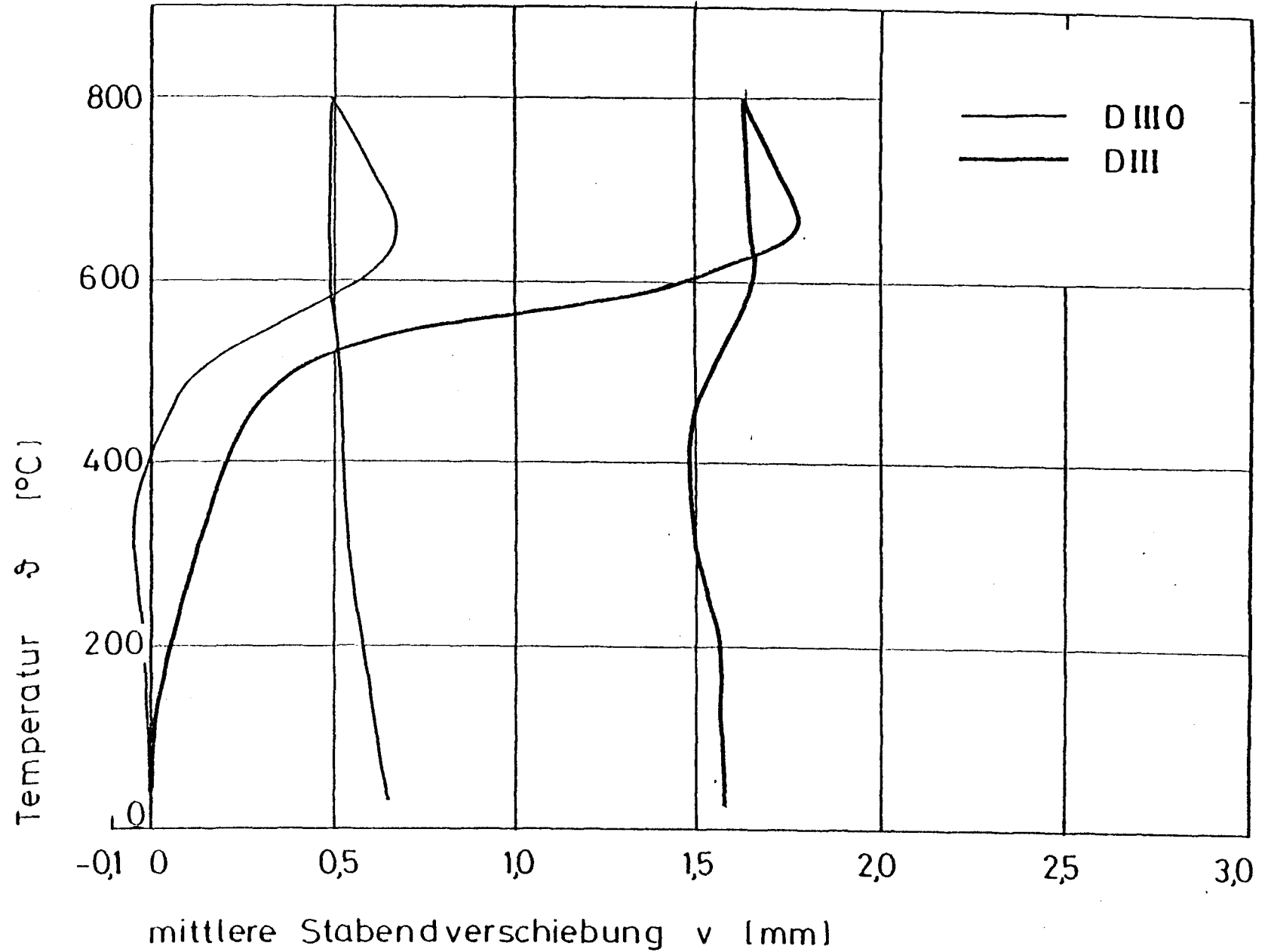
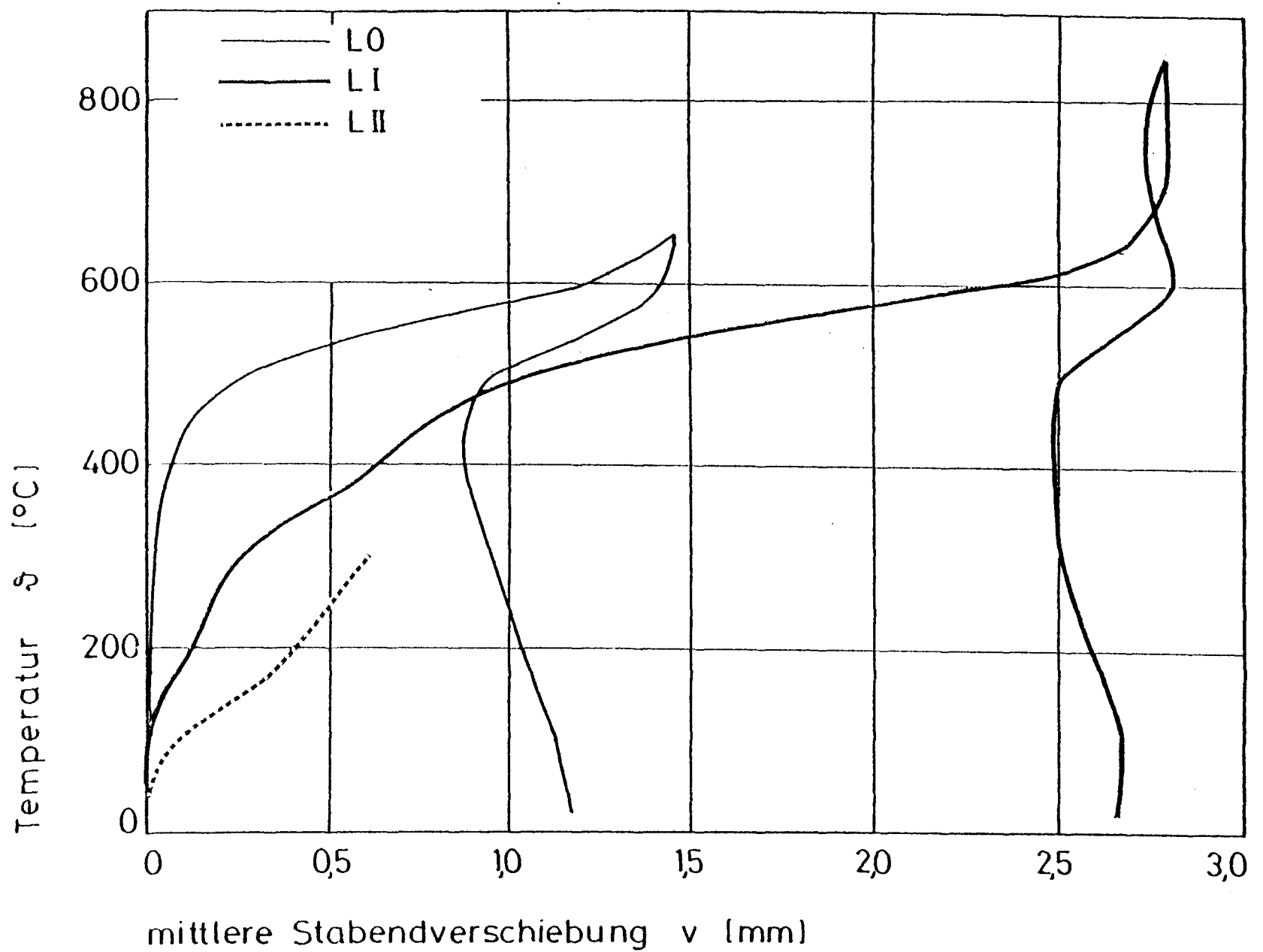


Bild 5.35: Mittlere temperaturabhängige Stabendverschiebungen der DIII-Körper



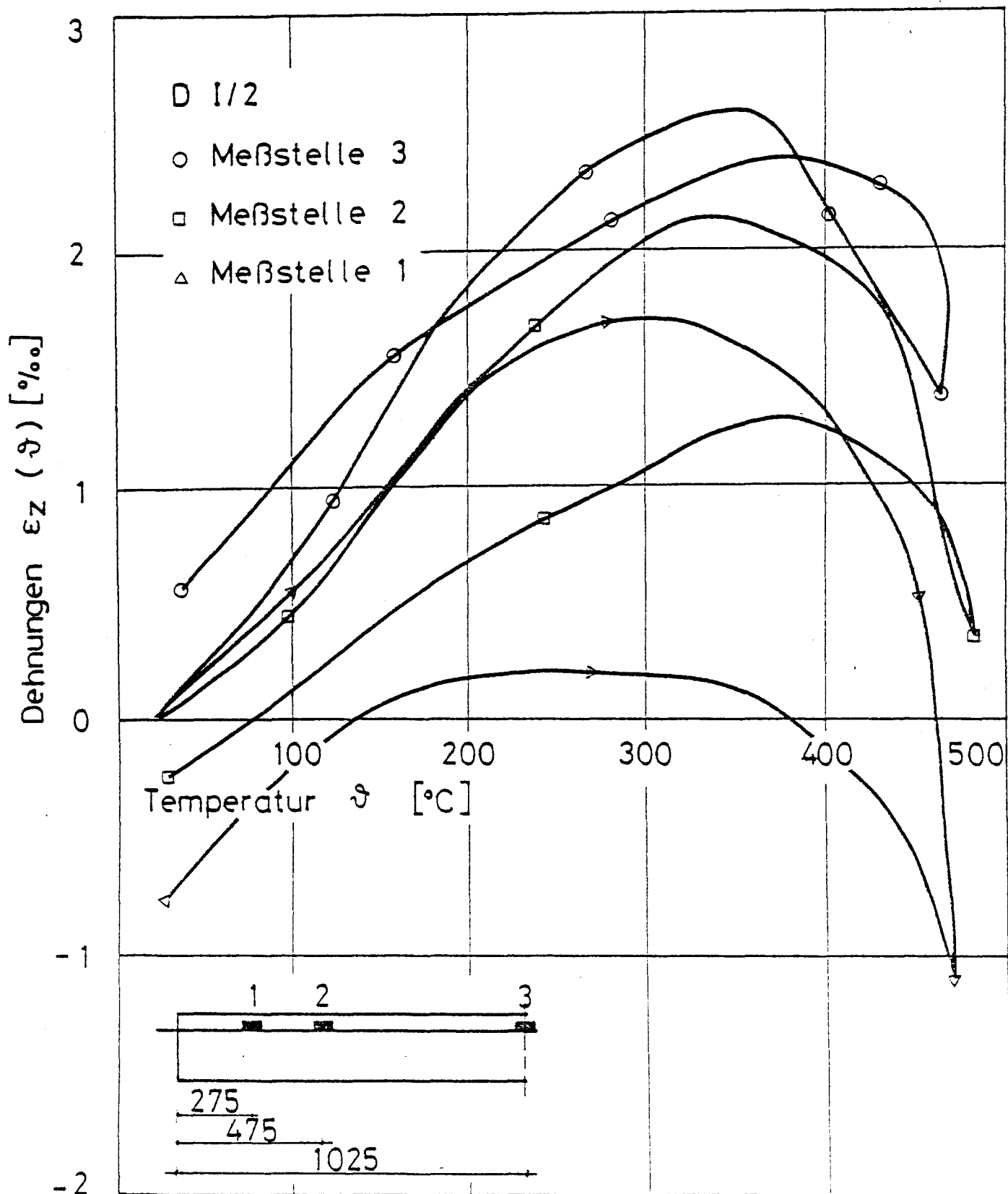


Bild 5.37: Temperaturabhängige Stahldehnungen von DI/2

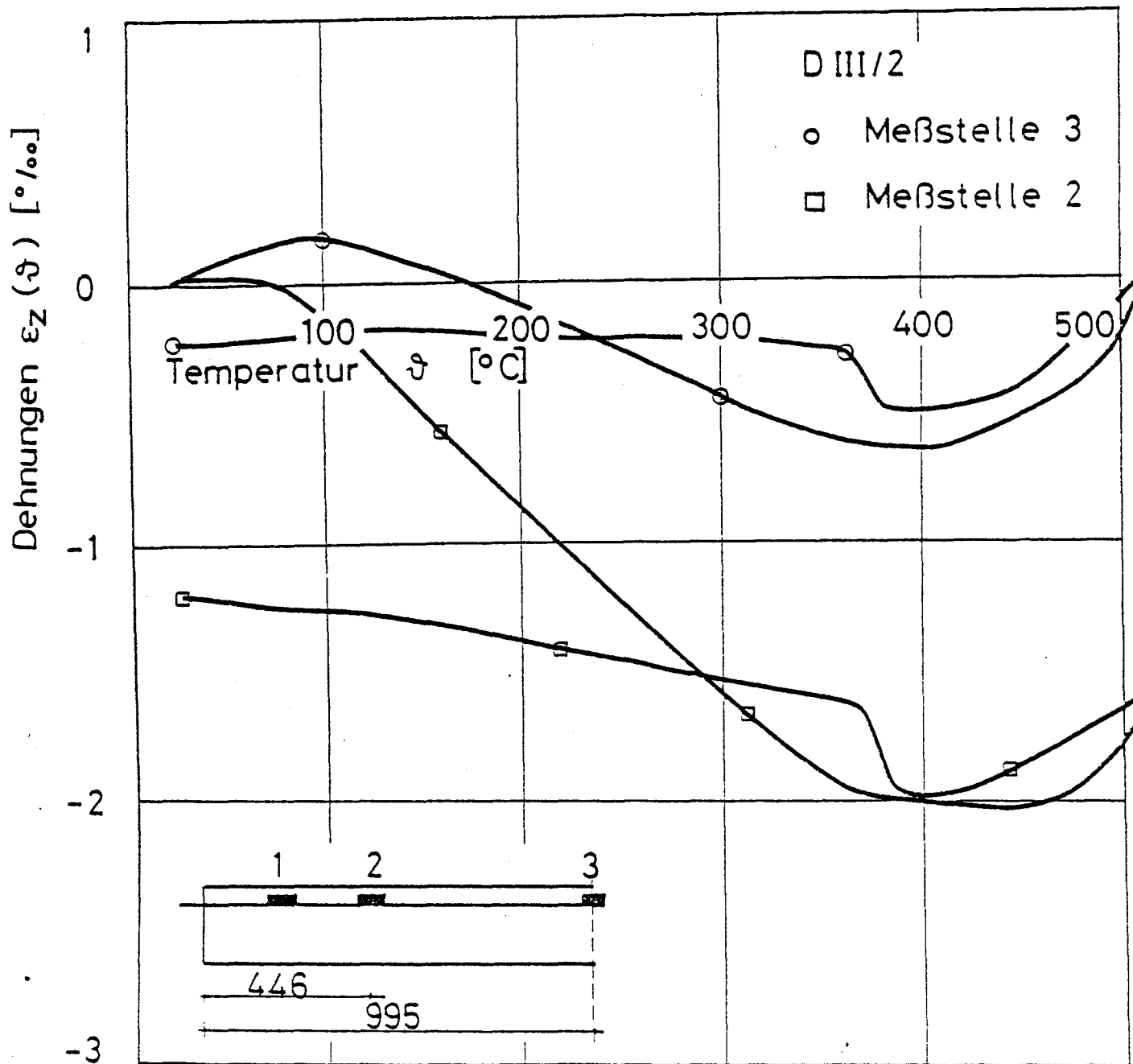


Bild 5.38: Temperaturabhängige Stahldehnungen von D III/2

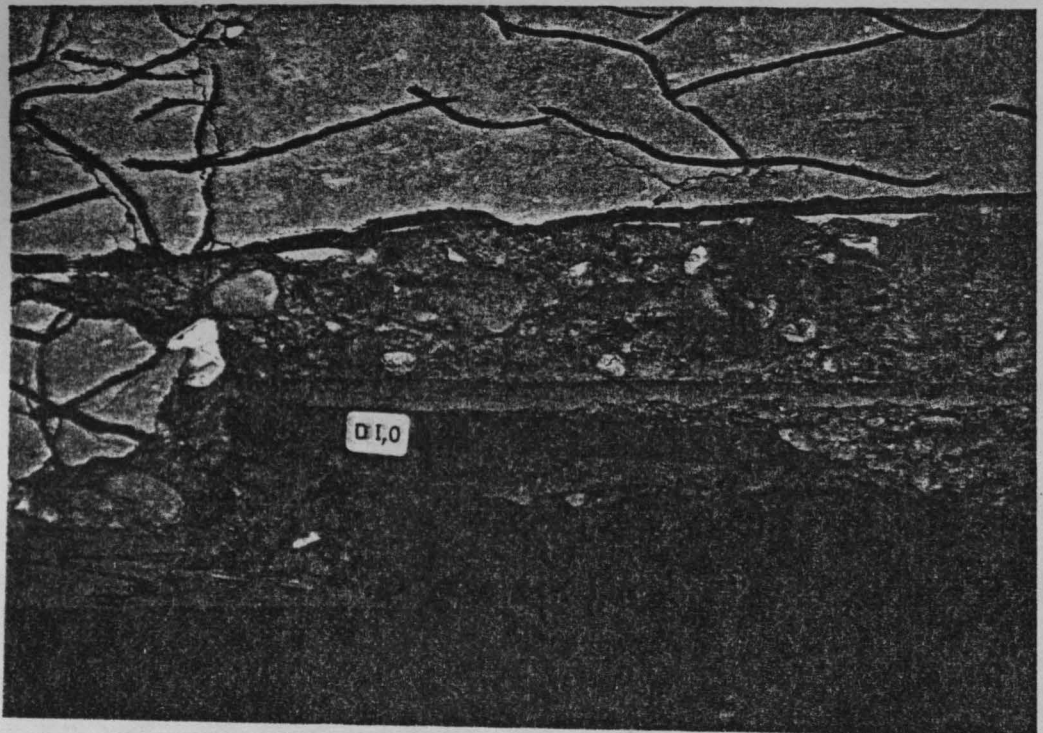
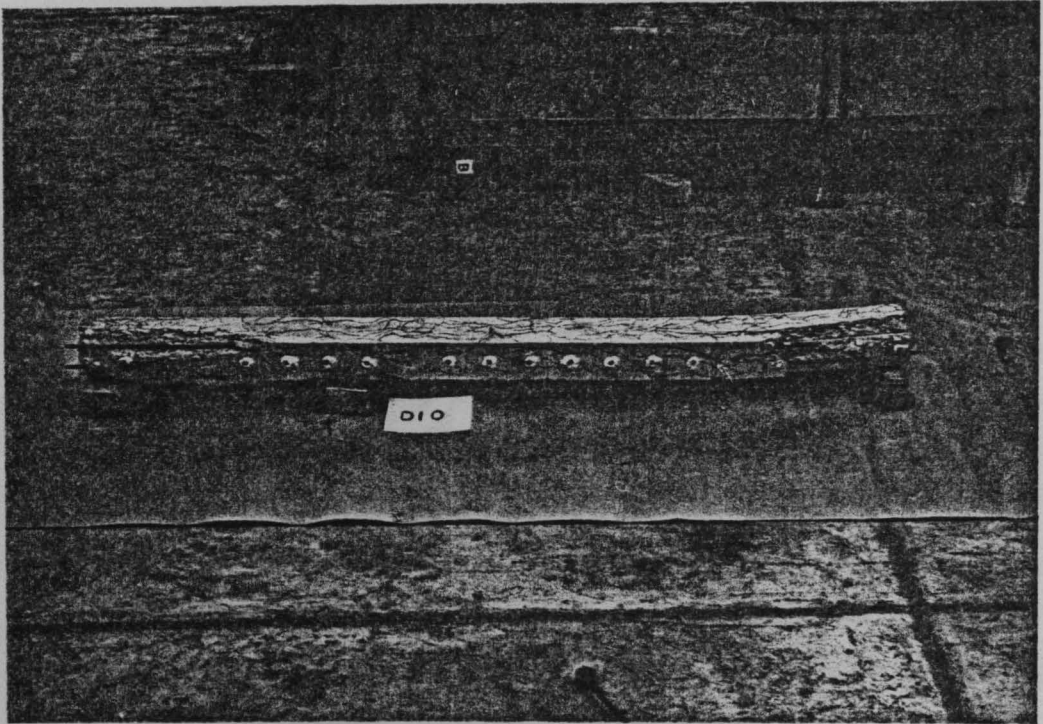


Bild 5.39: Gesamtansicht des Versuchskörpers DO nach dem Versuch (oben). Detailansicht von der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)

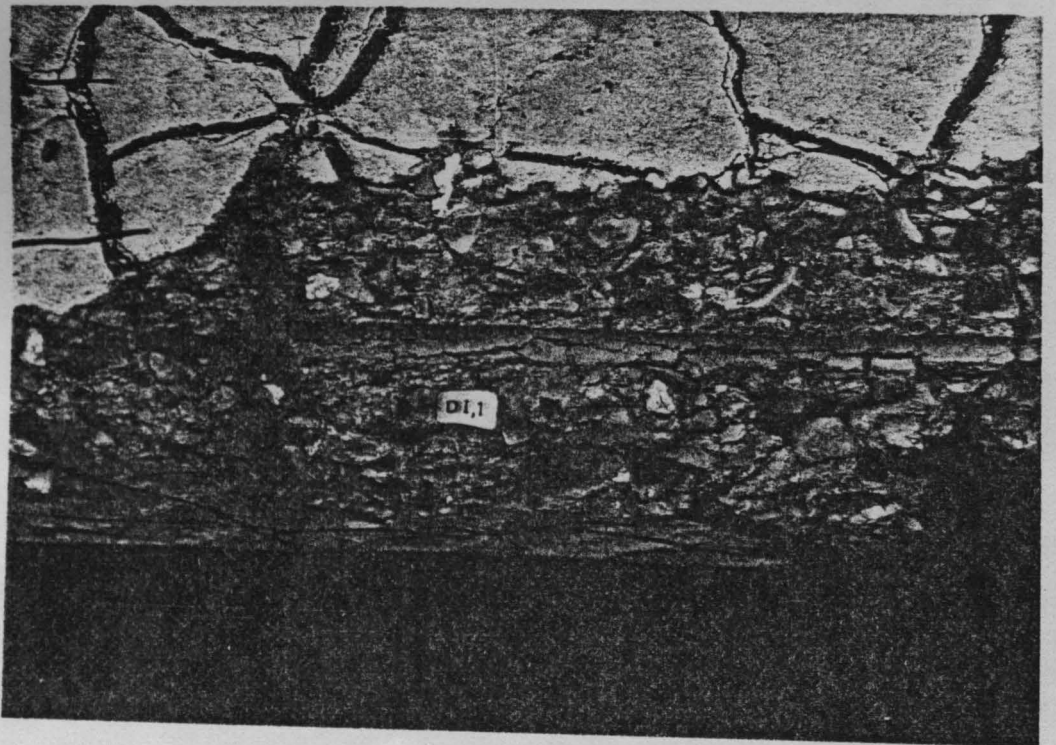
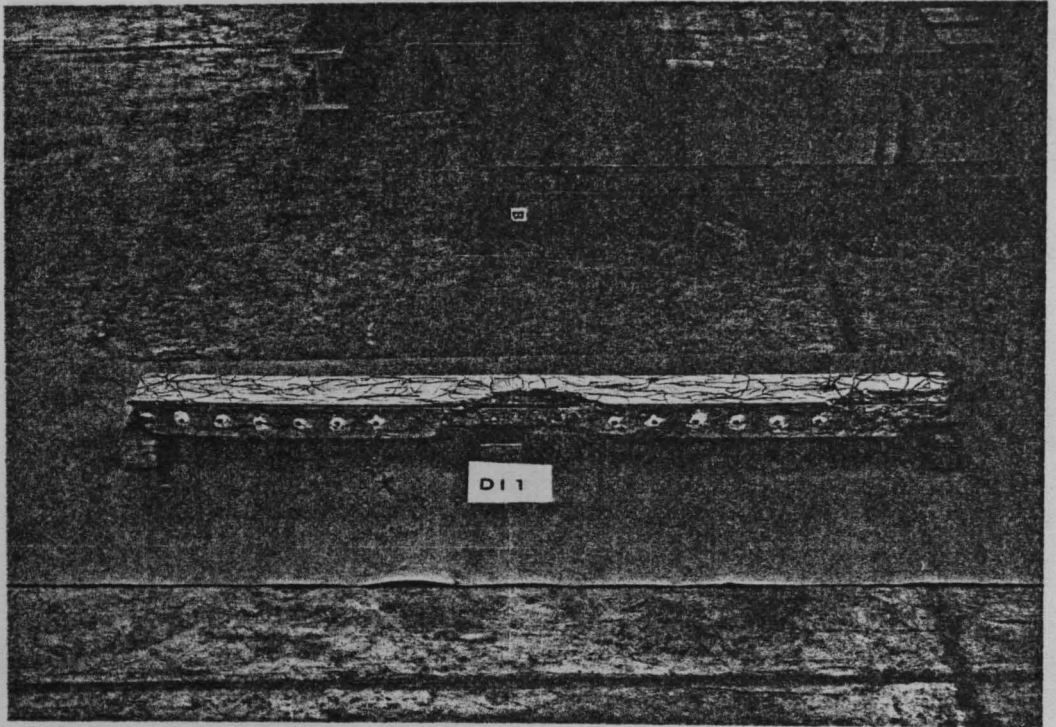


Bild 5.40: Gesamtansicht des Versuchskörpers DI/1 nach dem Versuch (oben). Detailansicht von der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)



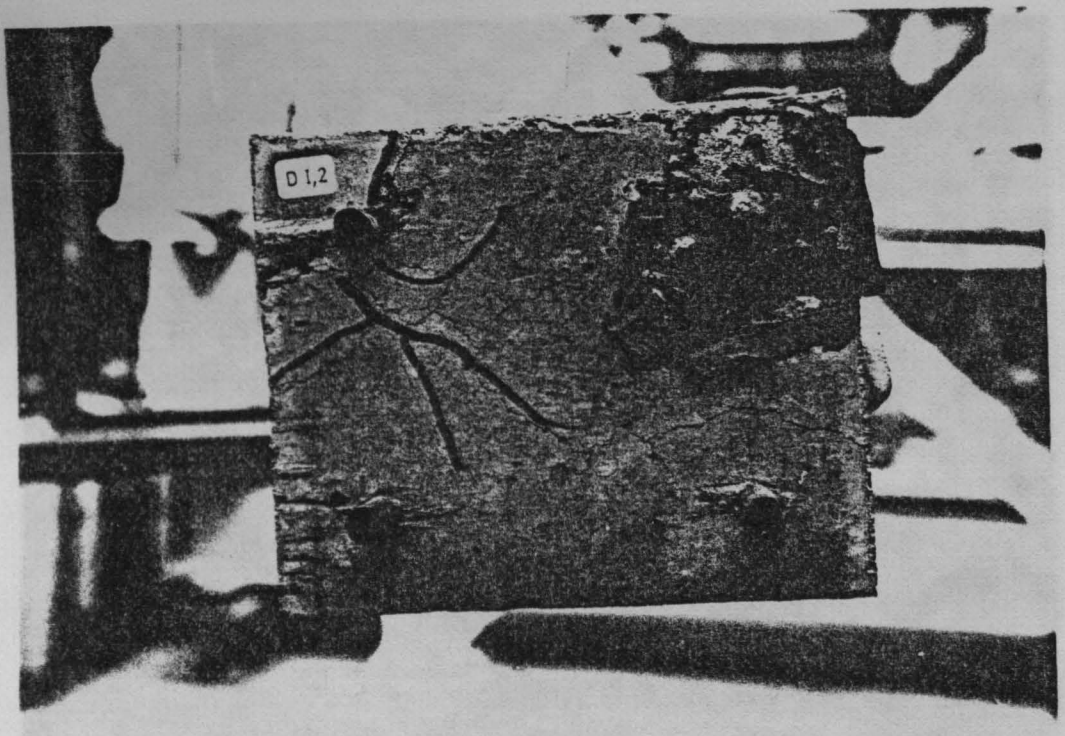
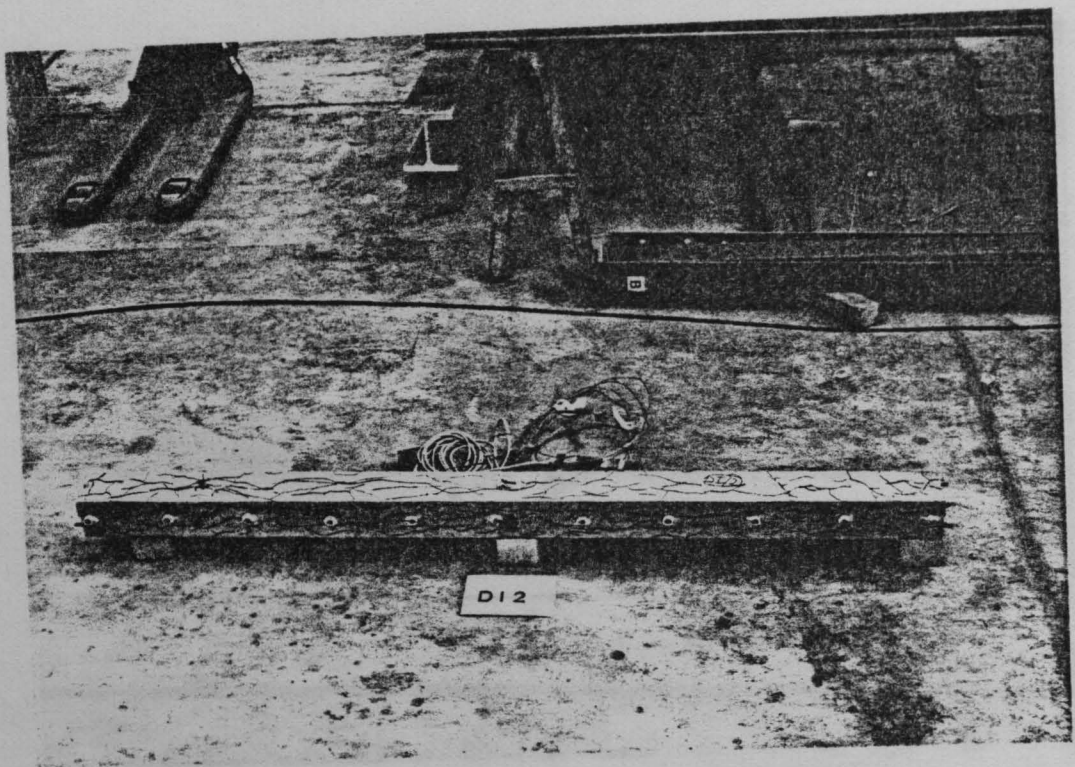


Bild 5.41: Gesamtansicht des Versuchskörpers DI/2 nach dem Versuch (oben). Detailansicht der Stirnfläche nach dem Versuch (unten)

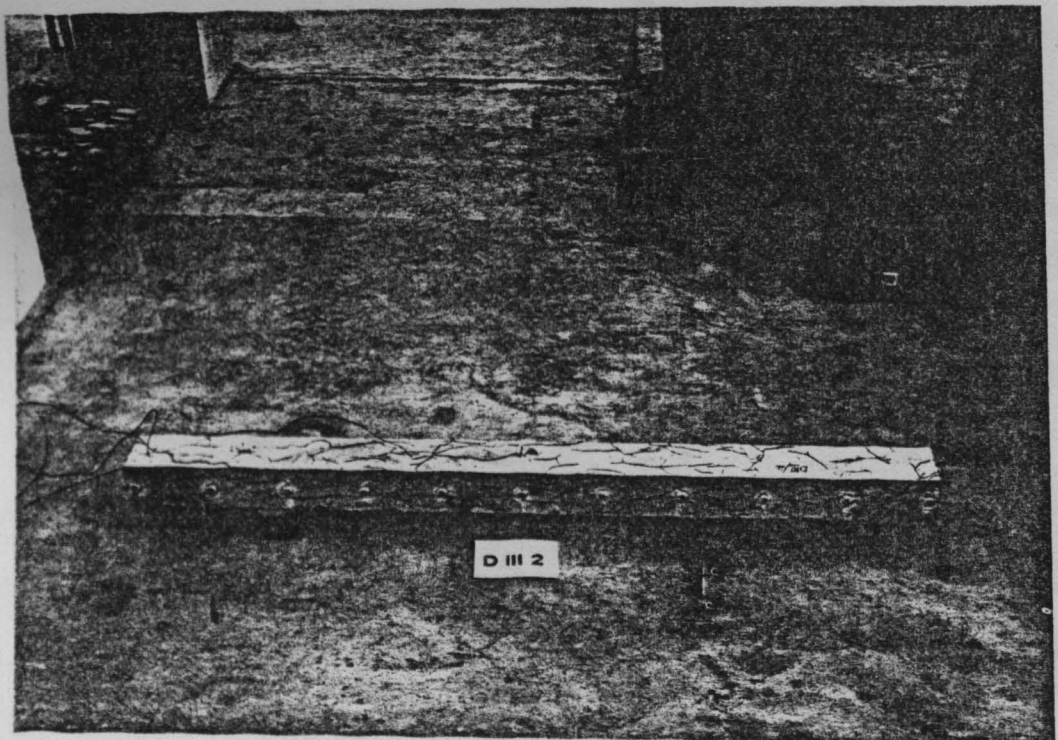
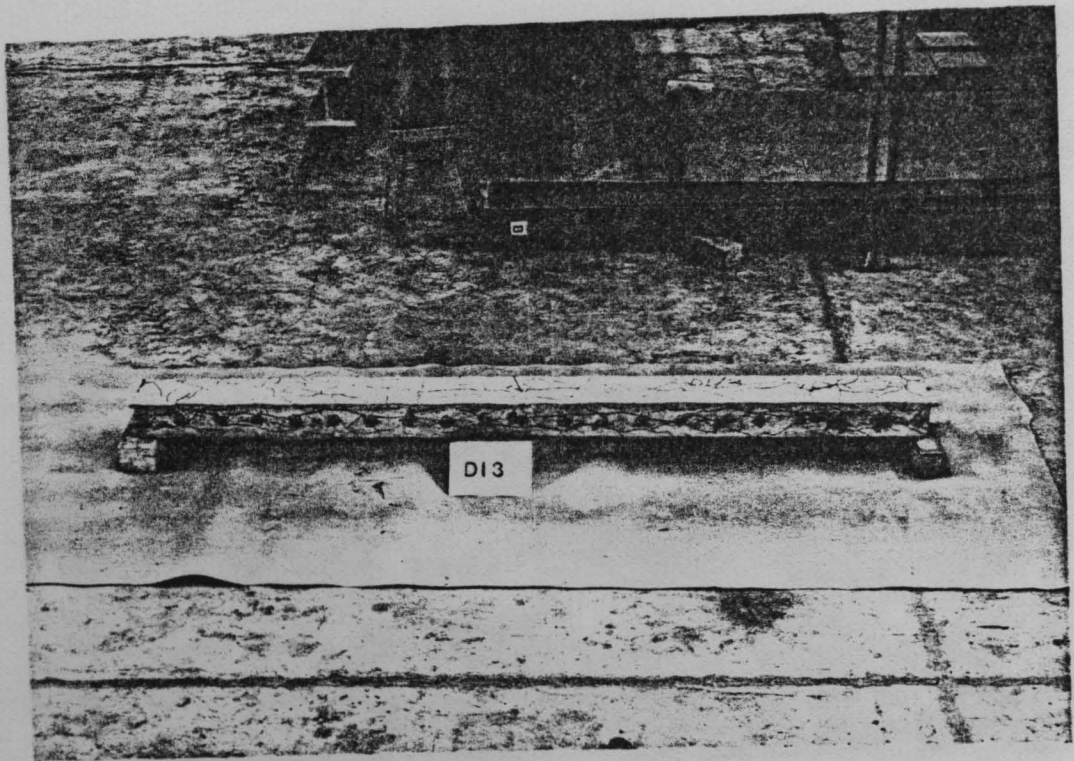


Bild 5.42: Gesamtansicht der Versuchskörper nach dem Versuch - DI/3 (oben) - DIII/2 (unten)



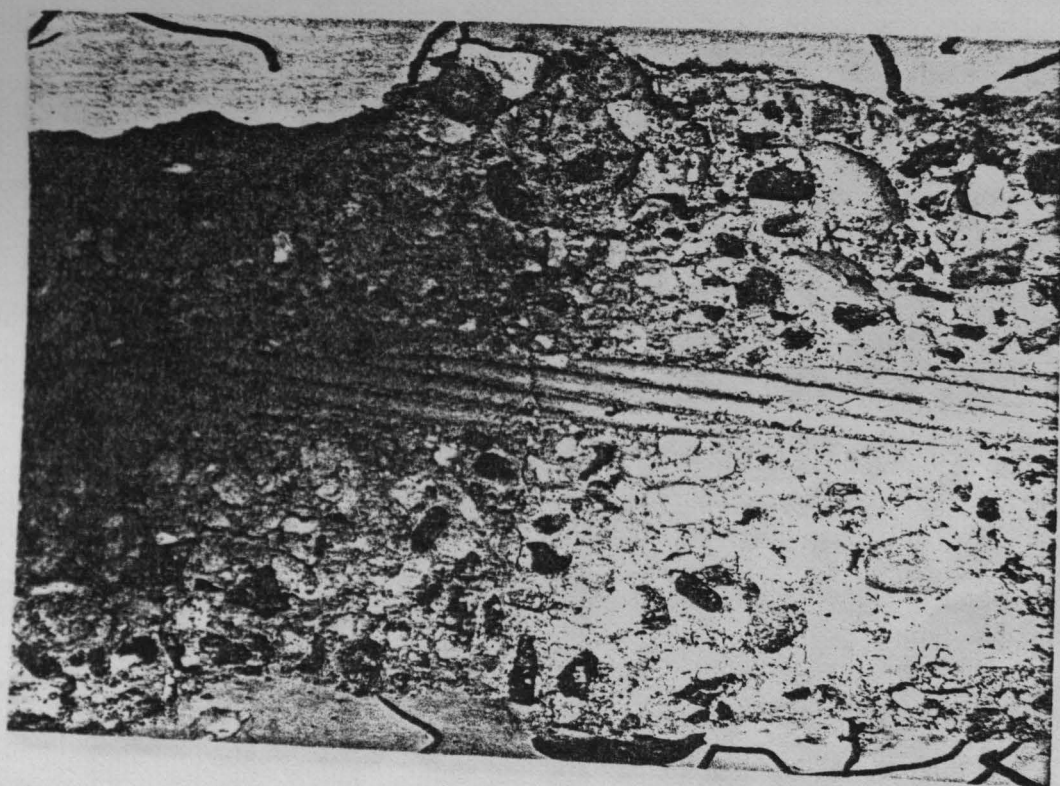
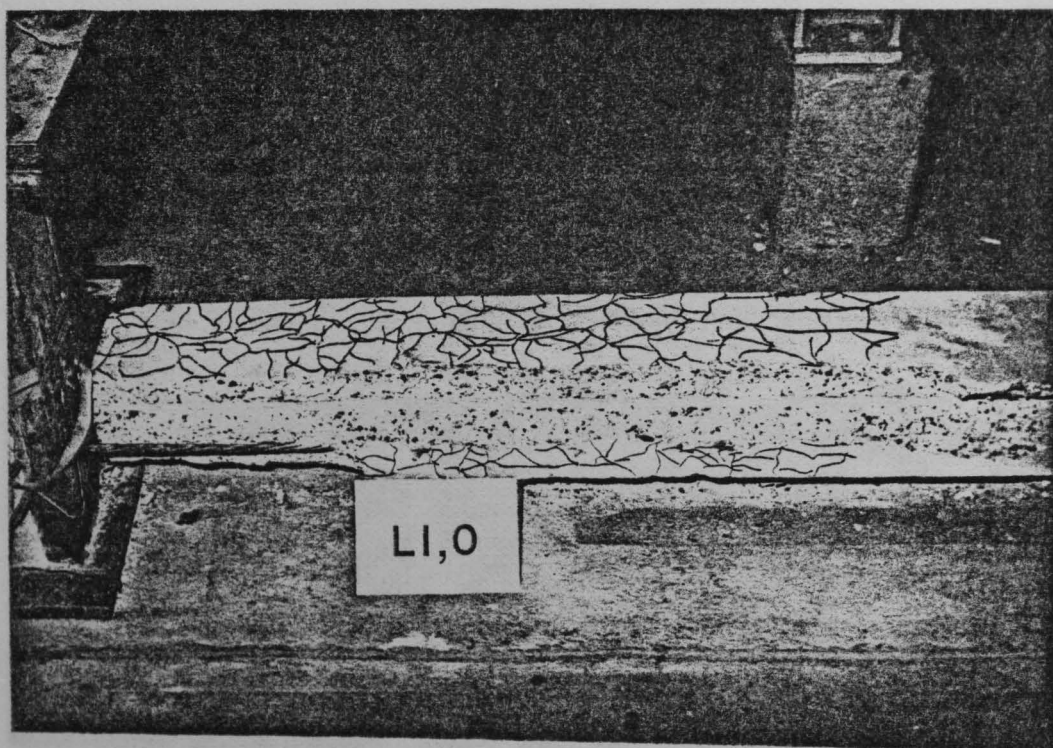


Bild 5.43: Rißbild der Eintragungszone des nicht vorgespannten L-Körpers nach einer Temperaturbeanspruchung von  $600^{\circ}\text{C}$  (oben). Detailansicht von der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)

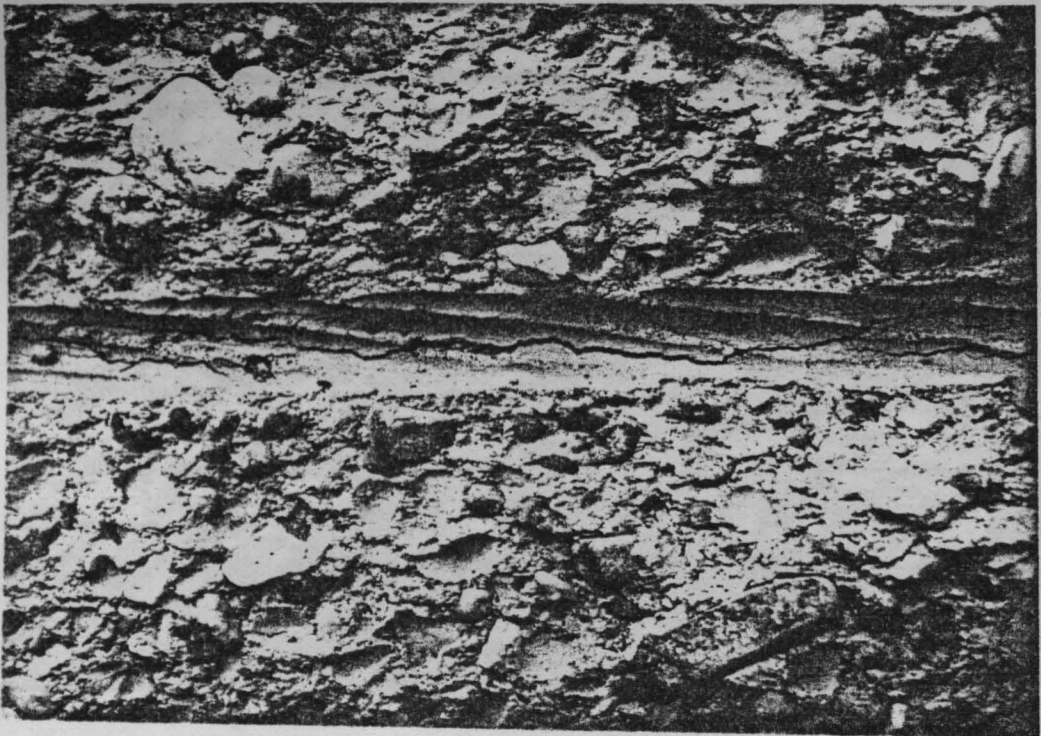
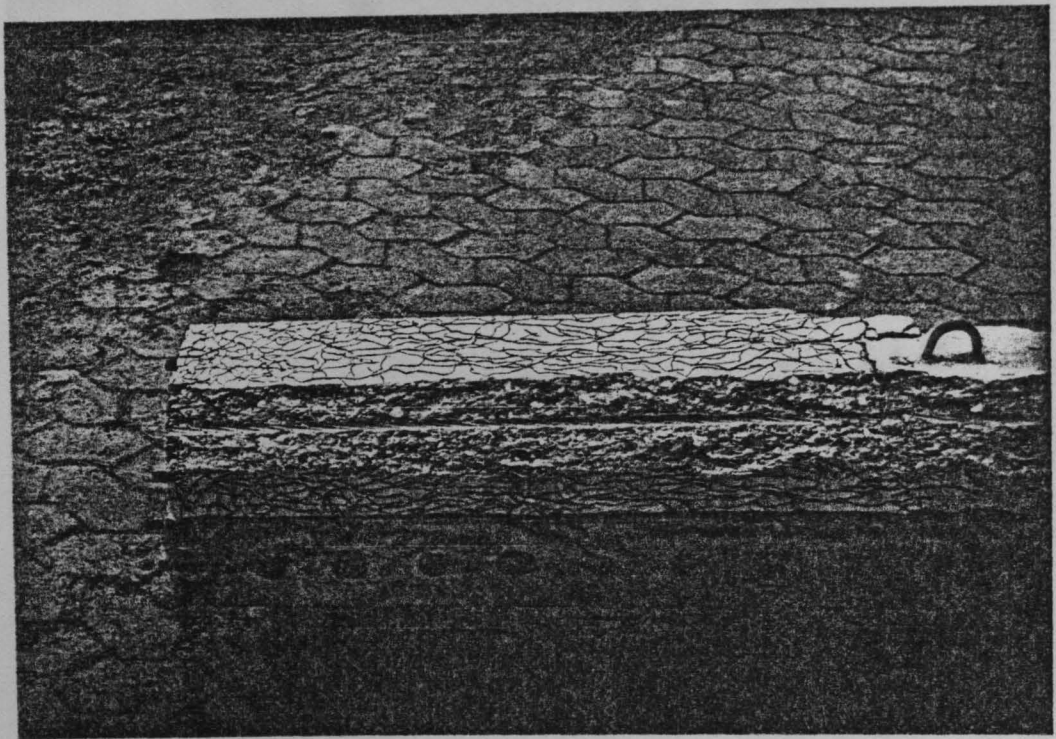


Bild 5.44: Rißbild der Eintragungszone des vorgespannten Versuchskörpers LI/1 nach einer Temperaturbeanspruchung von  $900^{\circ}\text{C}$  (oben). Detailansicht der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)



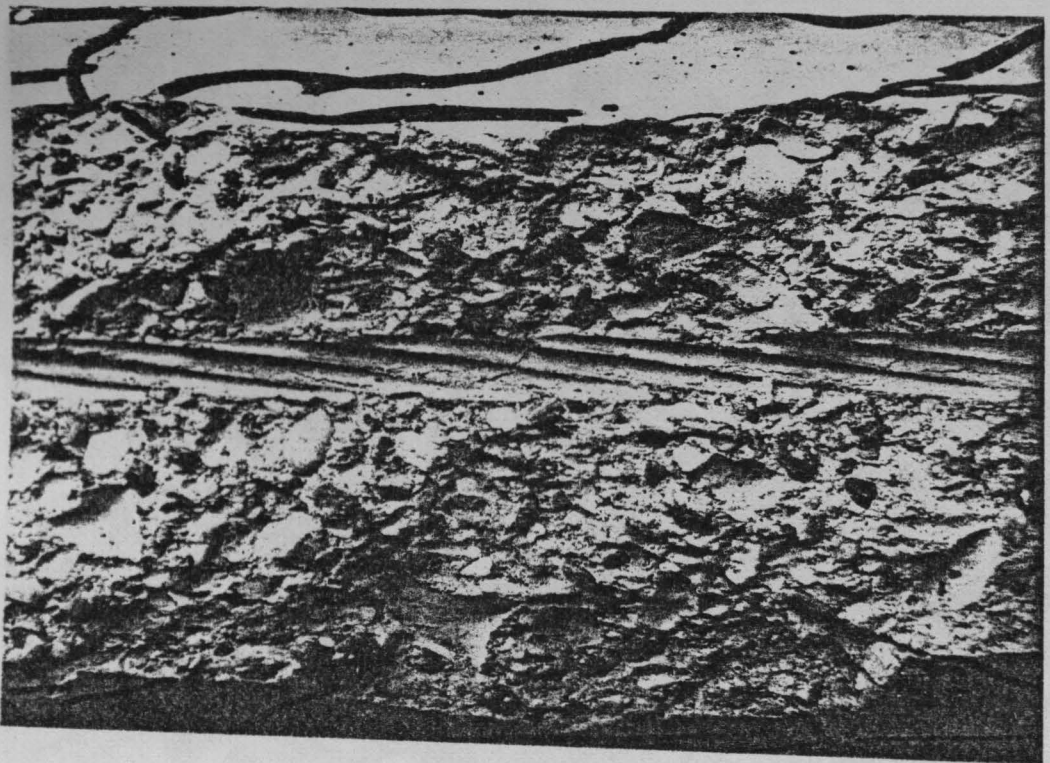
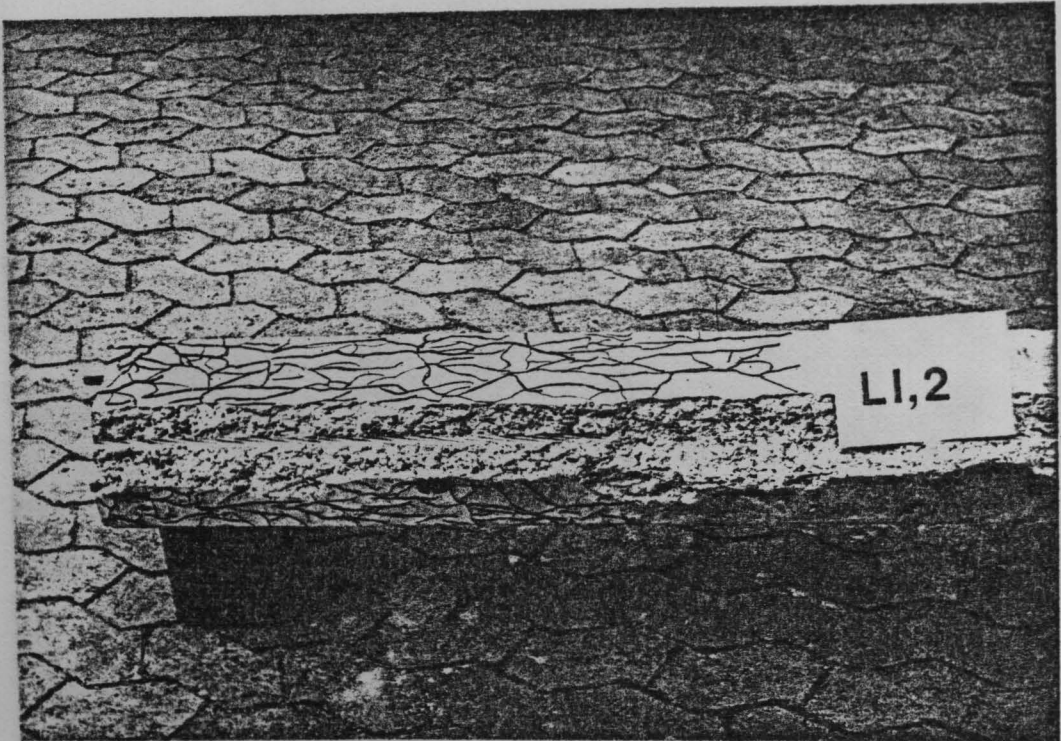


Bild 5.45: Rißbild der Eintragungszone des vorgespannten Versuchskörpers LI/2 nach einer Temperaturbeanspruchung von  $600^{\circ}\text{C}$  (oben). Detailansicht der Verbundzone im Eintragungsbereich (unten)

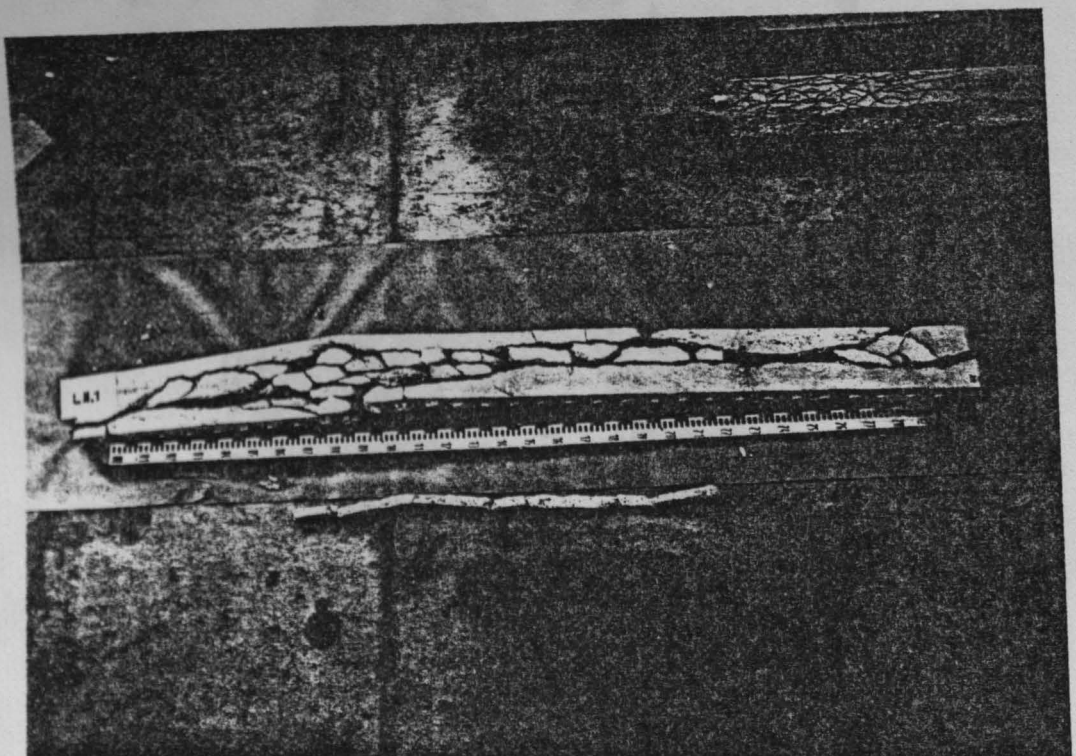
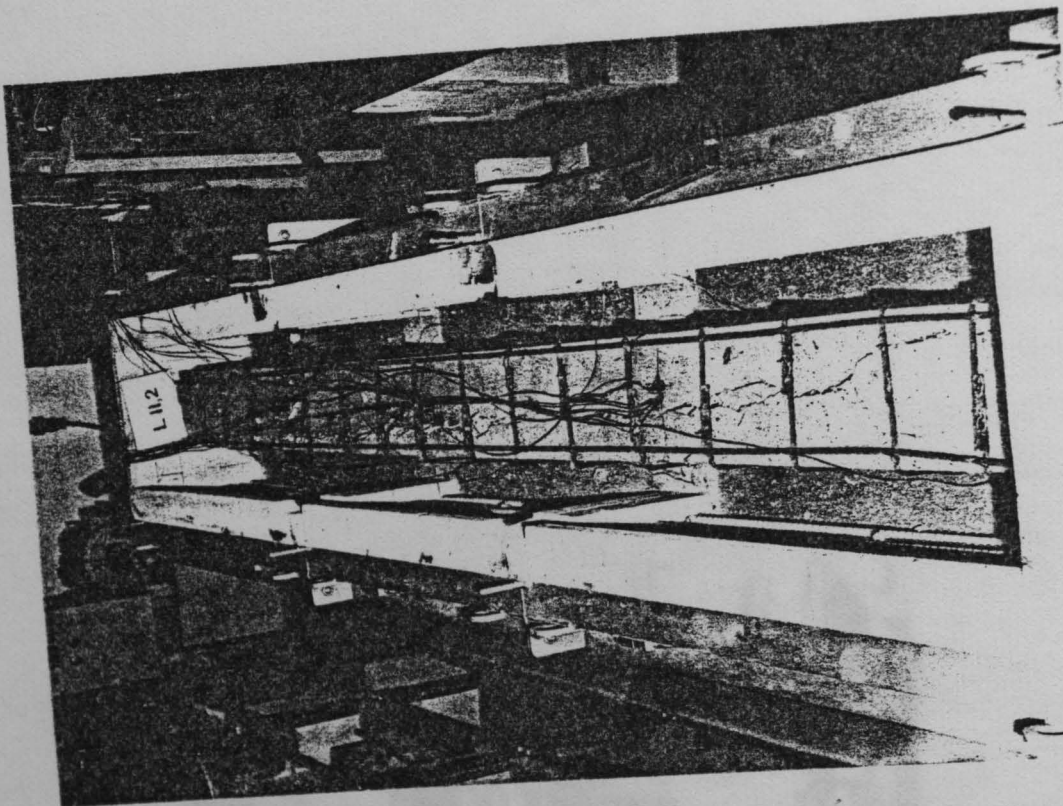


Bild 5.46: Die Versuchskörper LII/2 (oben) und LII/1 (unten) nach einer Temperaturbeanspruchung von rd 340°C.



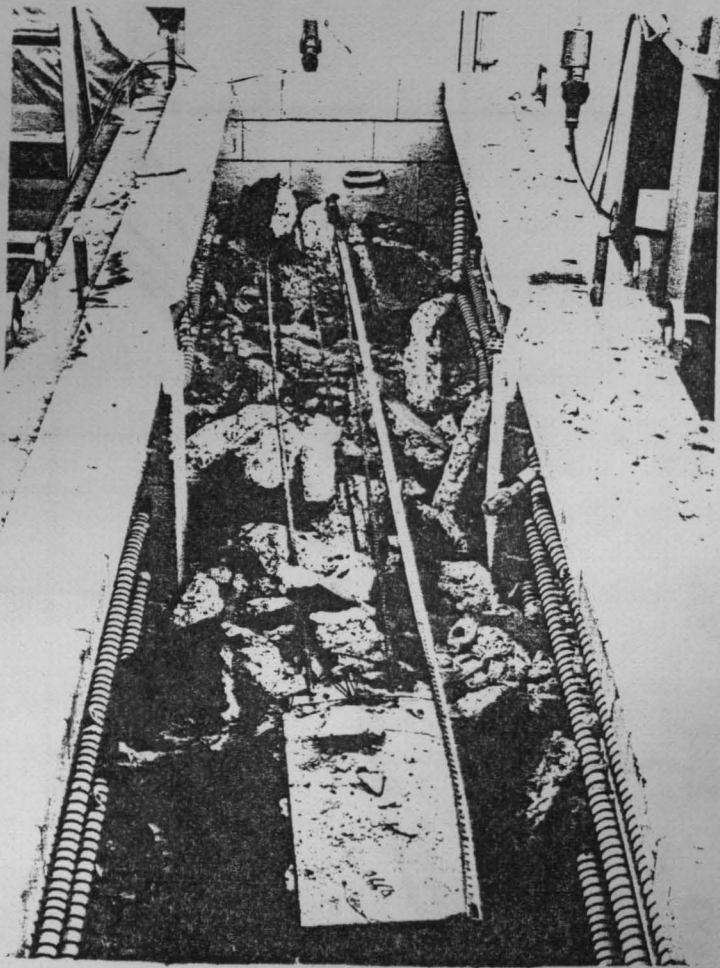


Bild 5.47: Der Versuchskörper DIII/3 nach einer Temperaturbeanspruchung von rd  $340^{\circ}\text{C}$  im Versuchsofen

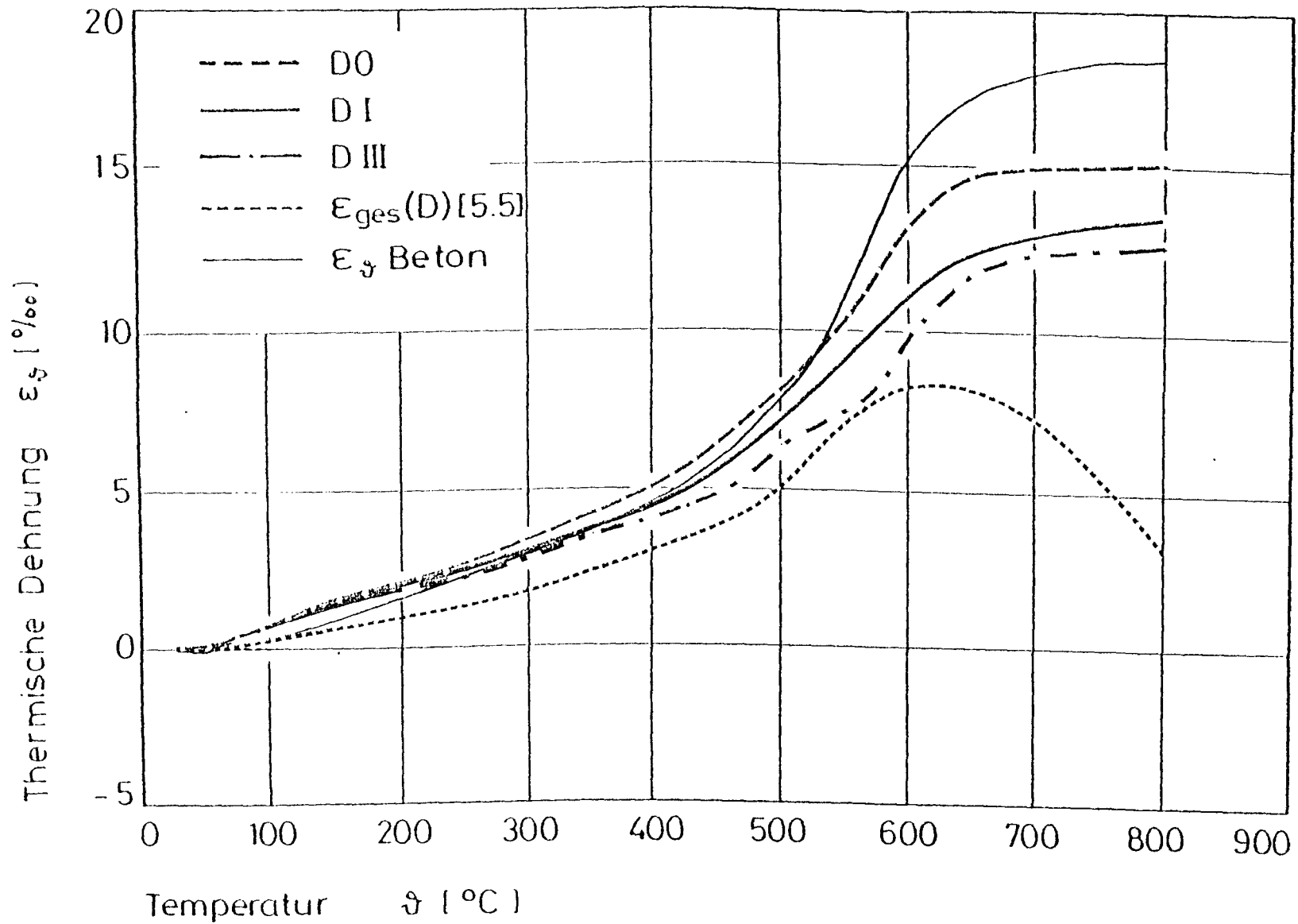


Bild 6.1: Thermische Dehnungen der Versuchskörper der D-Serie, thermische Dehnungen des Betons sowie die nach Schneider [5.5] berechnete instationäre Gesamtdéhnung



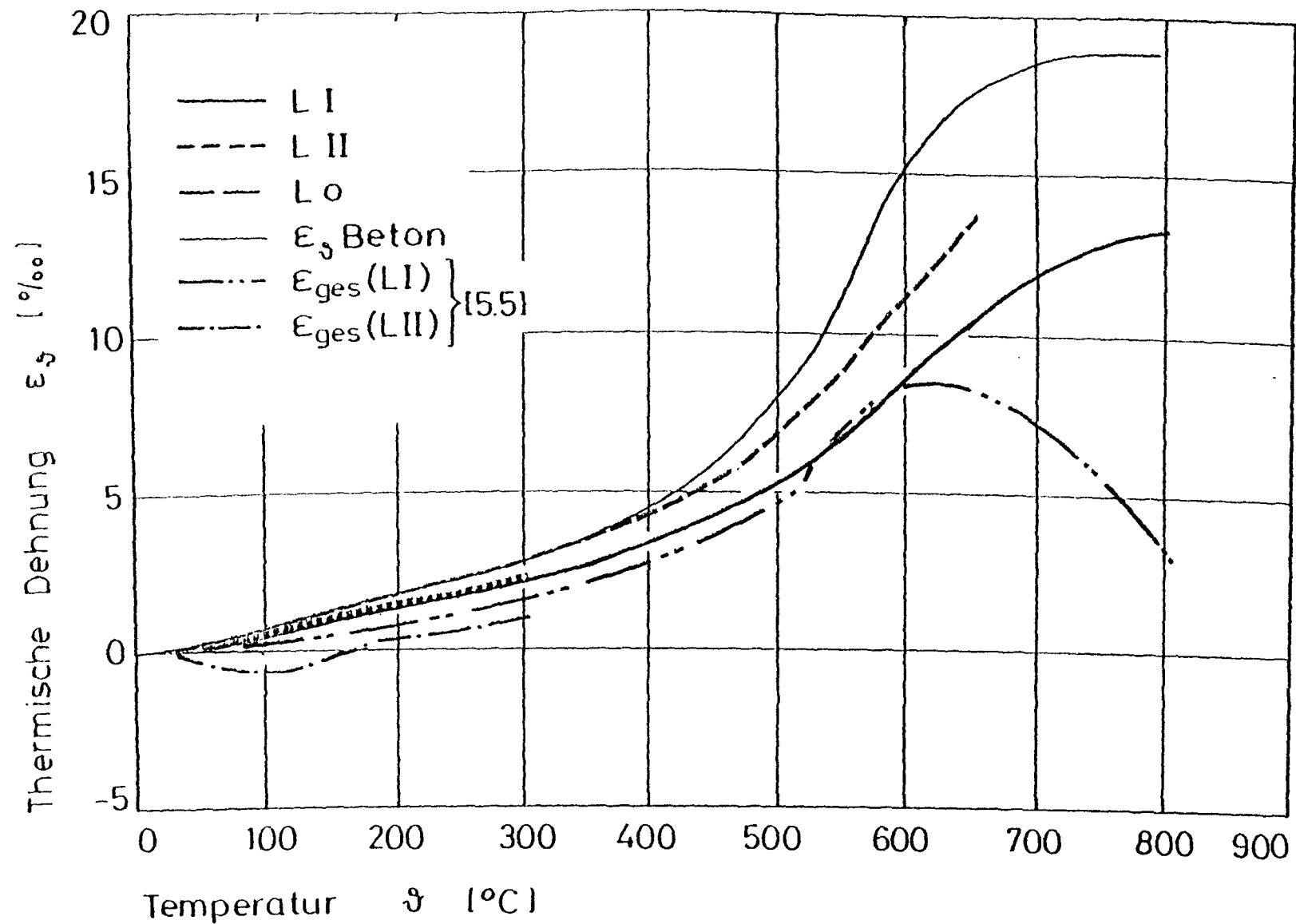
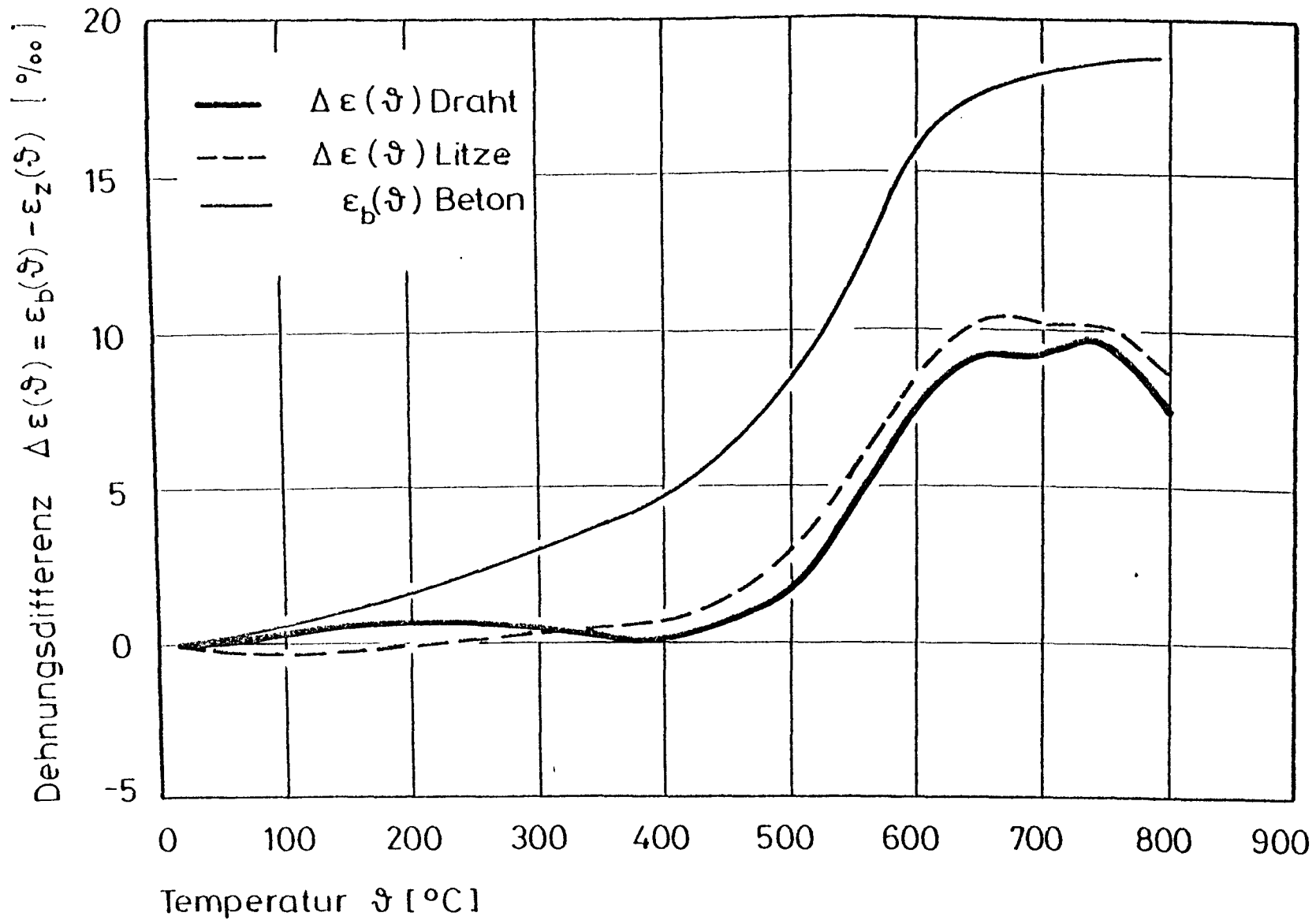


Bild 6.2: Thermische Dehnungen der Versuchskörper der L-Serie, thermische Dehnungen des Betons sowie die nach Schneider [5.5] berechnete instationäre Gesamtdehnung



**Bild 6.3:** Differenzdehnung zwischen Beton-Litze, Beton-Spanndraht sowie die Dehnung des Betons in Abhängigkeit von der Temperatur

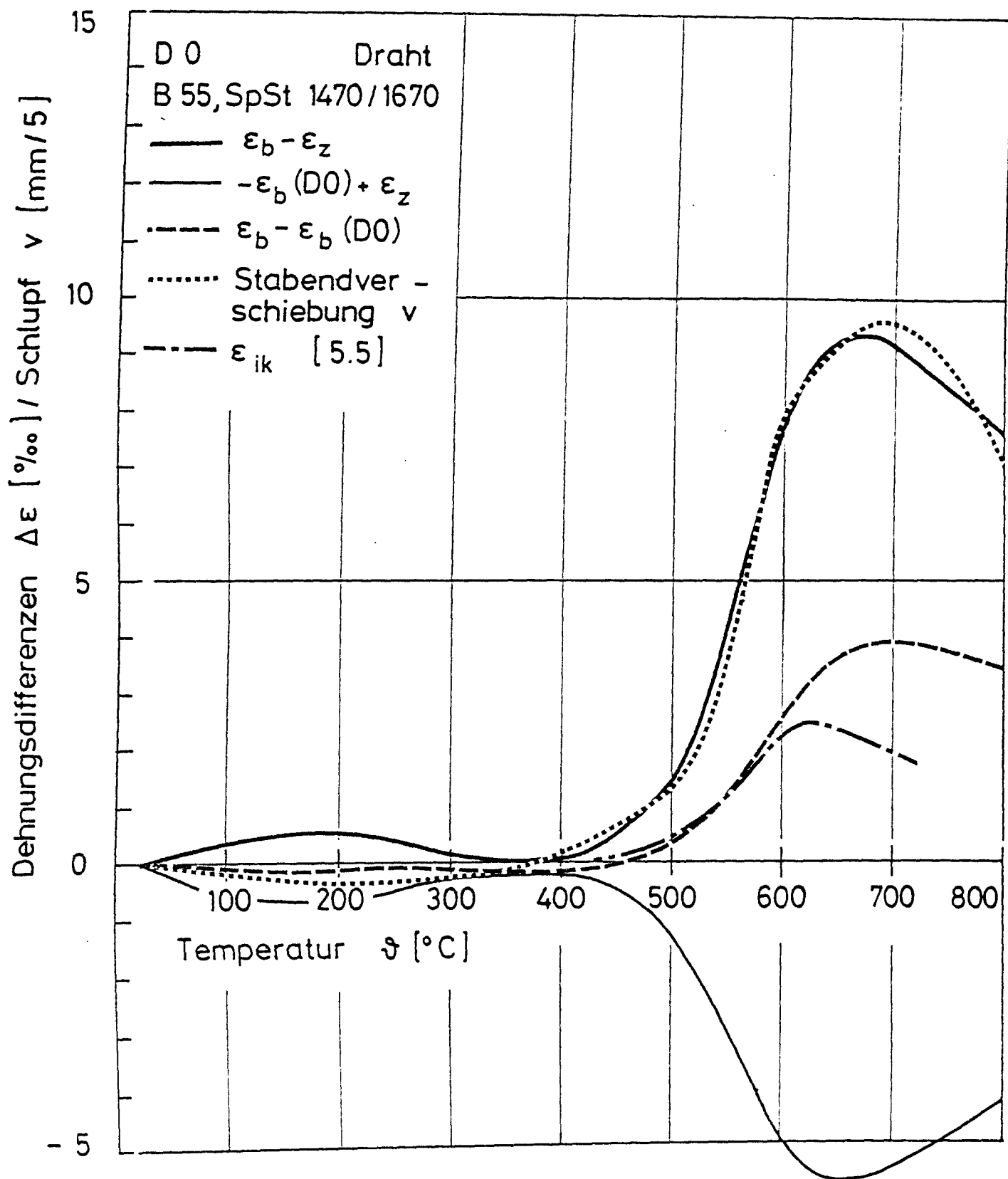


Bild 6.4: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von D0 in Abhängigkeit von der Temperatur

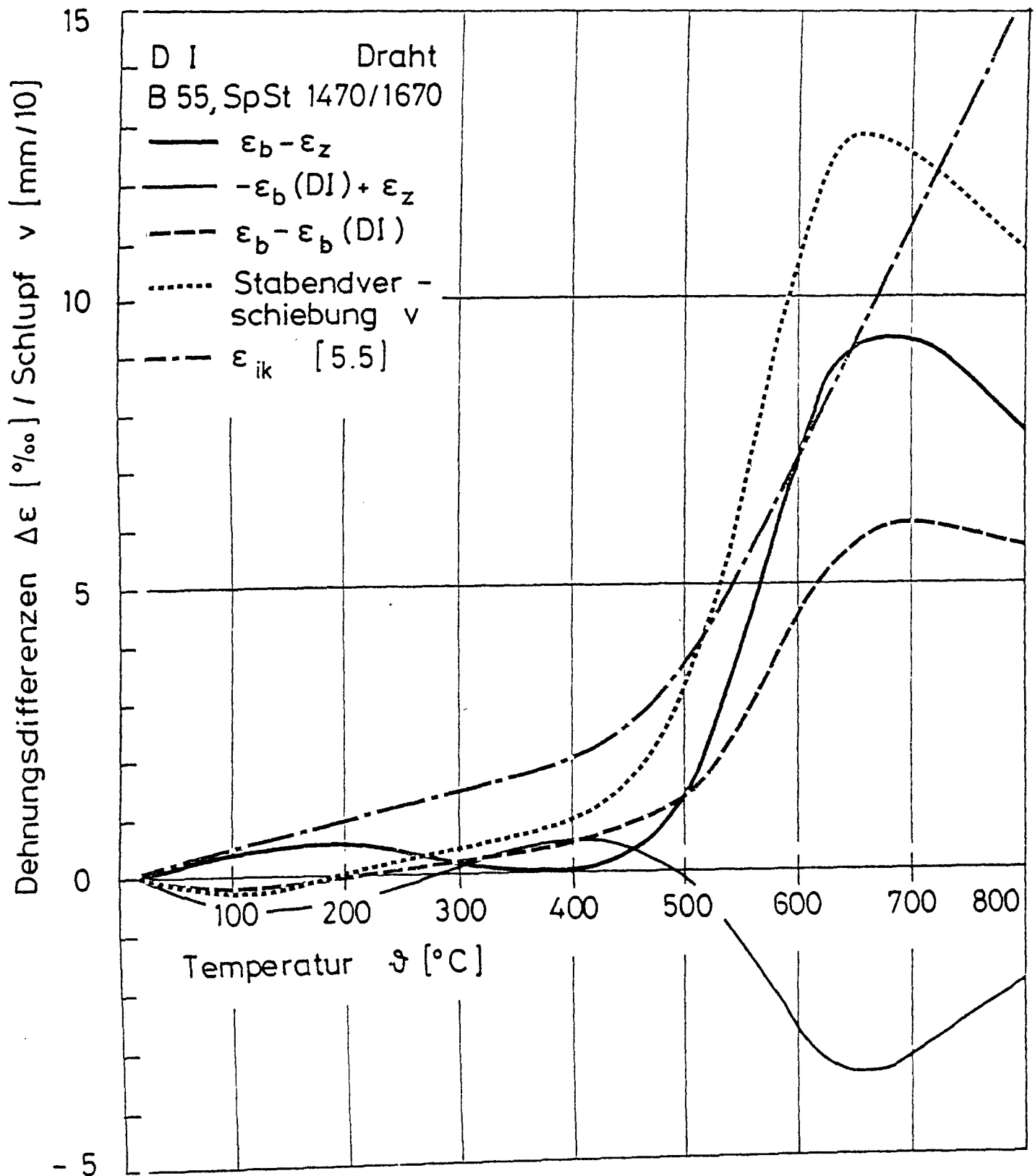
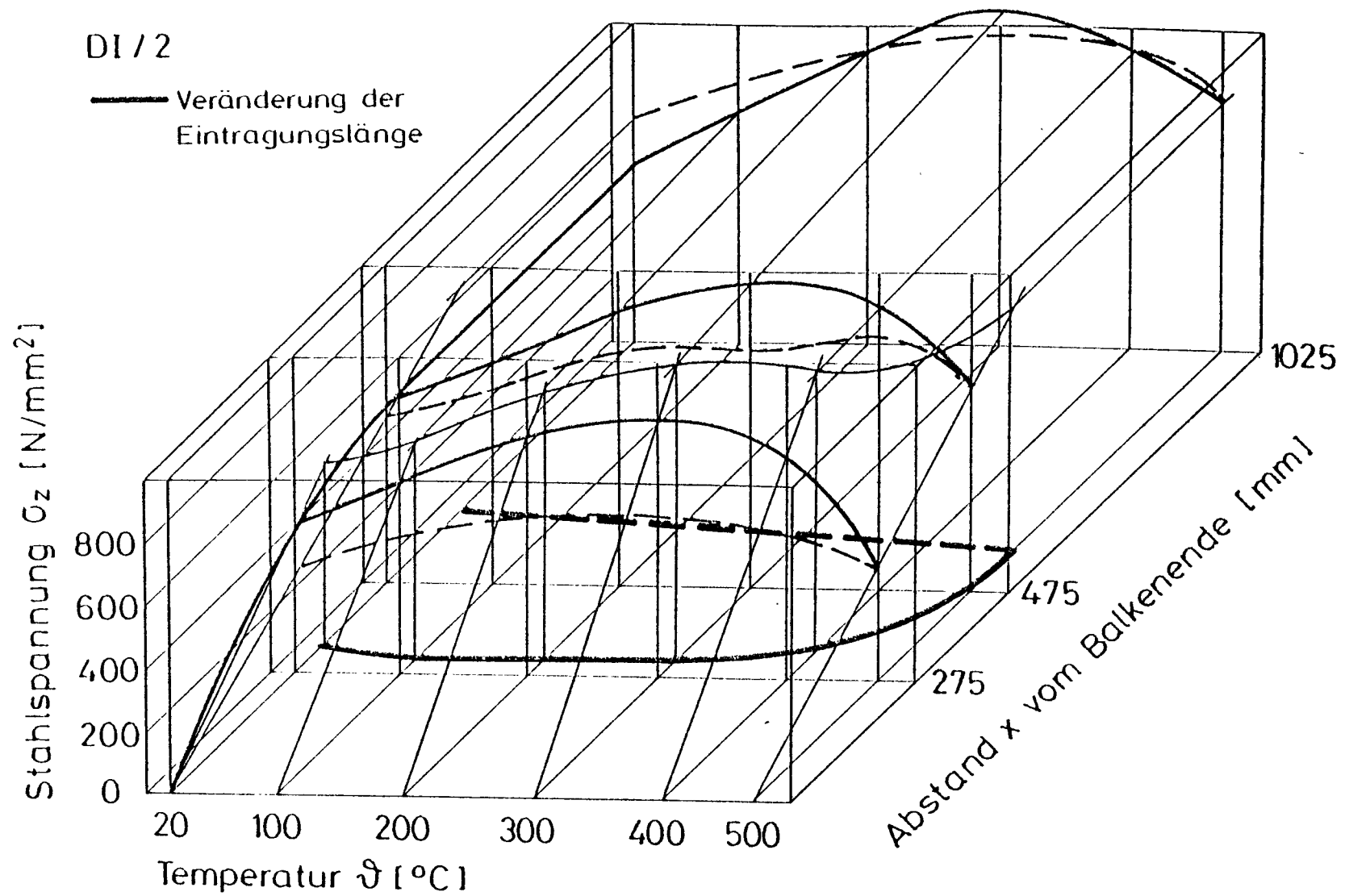


Bild 6.5: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von DI in Abhängigkeit von der Temperatur



**Bild 6.6:** Temperaturabhängige Veränderung der Stahlspannungen, über die halbe Balkenlänge aufgetragen, sowie die sich daraus ergebende Änderung der Eintragungslänge für DI/2

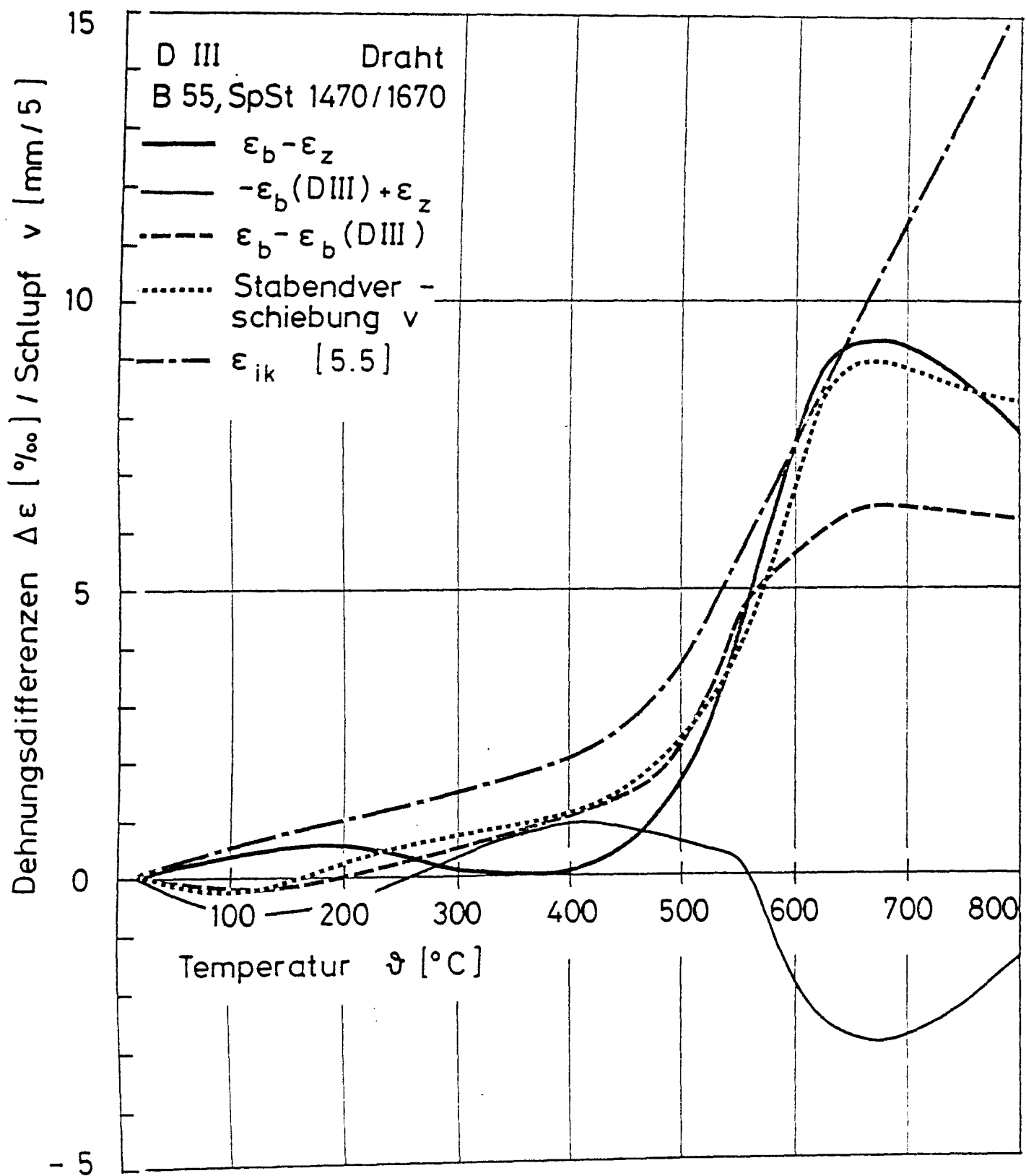


Bild 6.7: Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von DIII in Abhängigkeit von der Temperatur

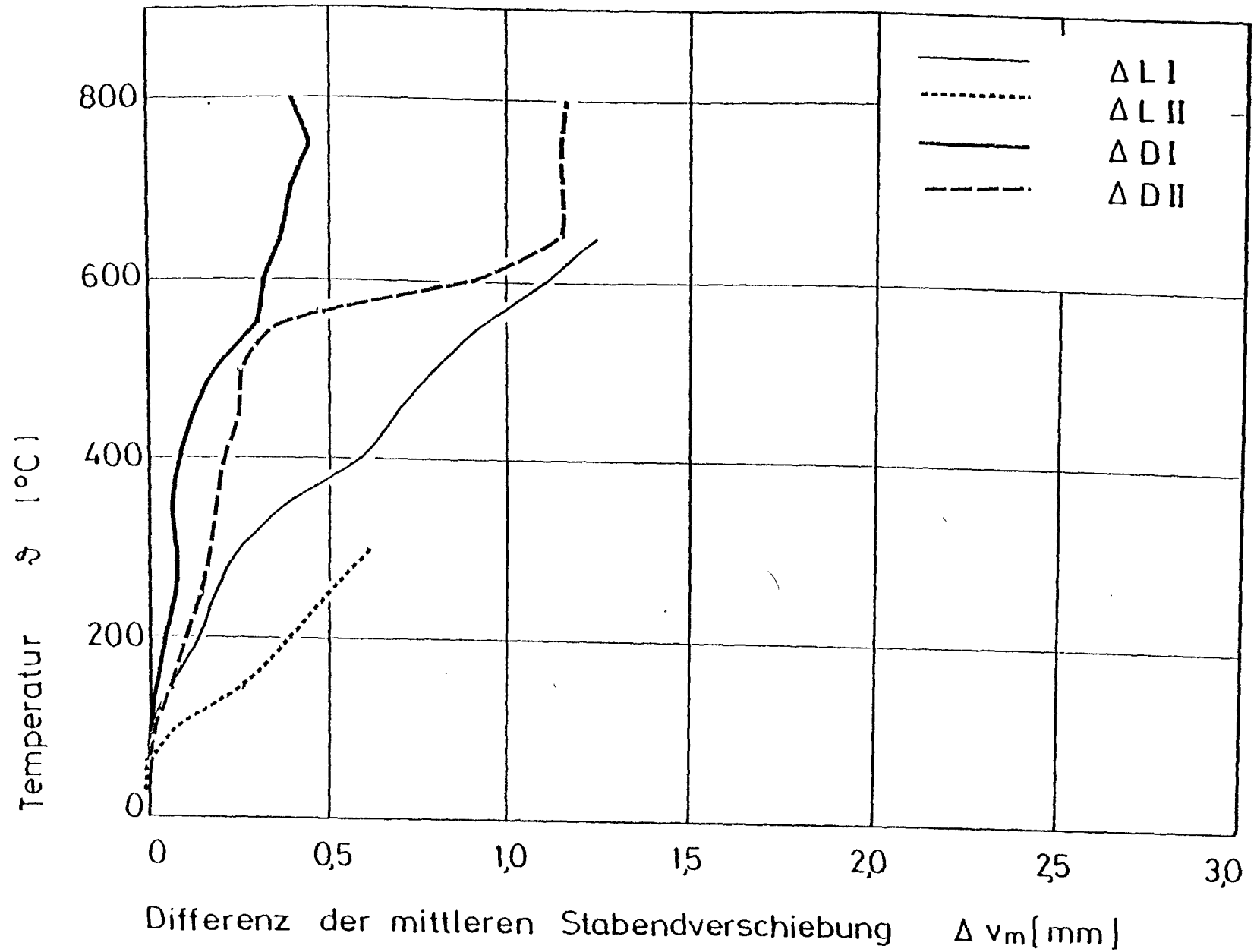
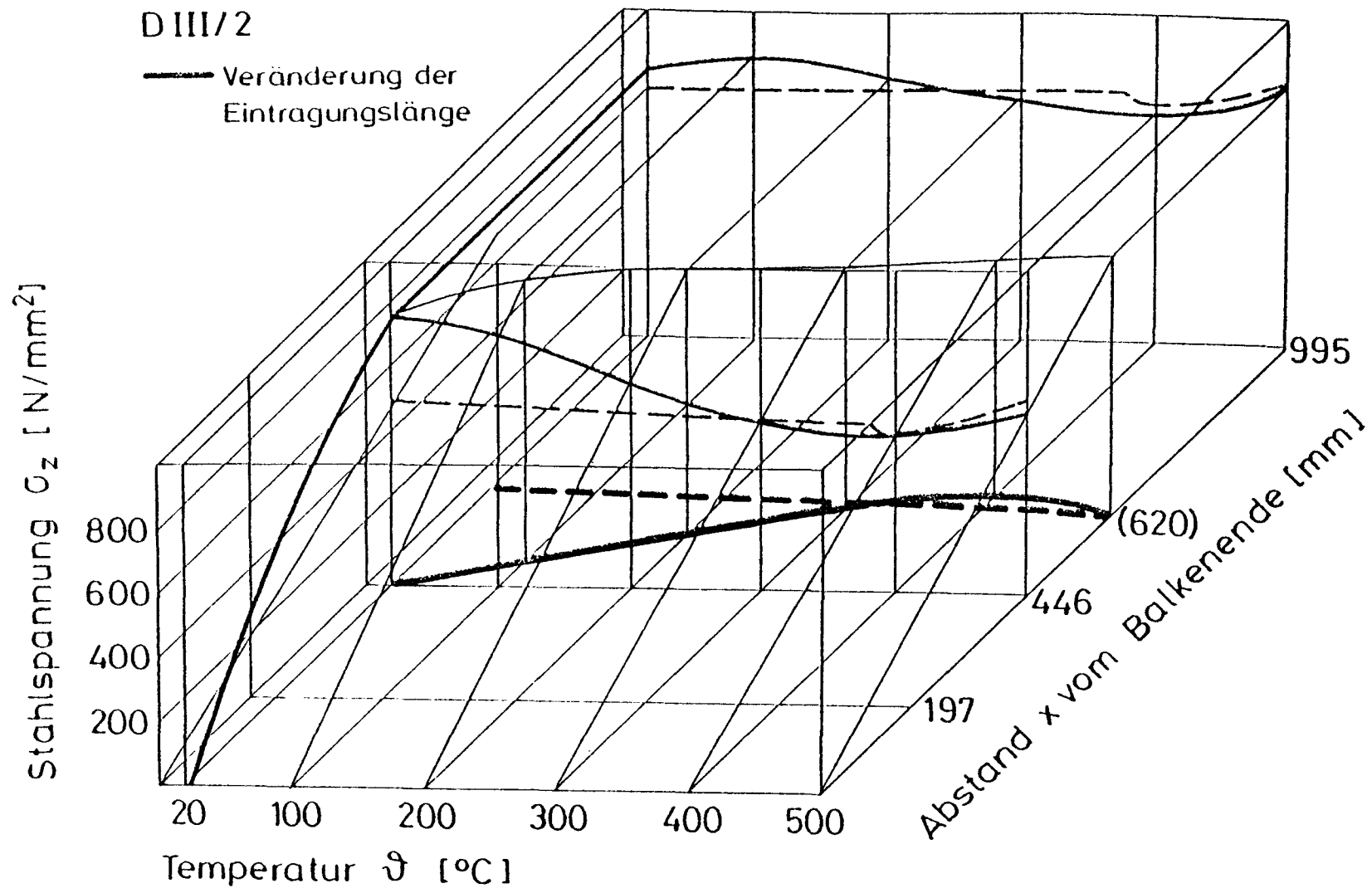


Bild 6.8: Mittlere lastbedingte Stabendverschiebungen in Abhängigkeit von der Temperatur



**Bild 6.9:** Temperaturabhängige Veränderung der Stahlspannungen, über die halbe Balkenlänge aufgetragen, sowie die sich daraus ergebende Änderung der Eintragungslänge für D III/2



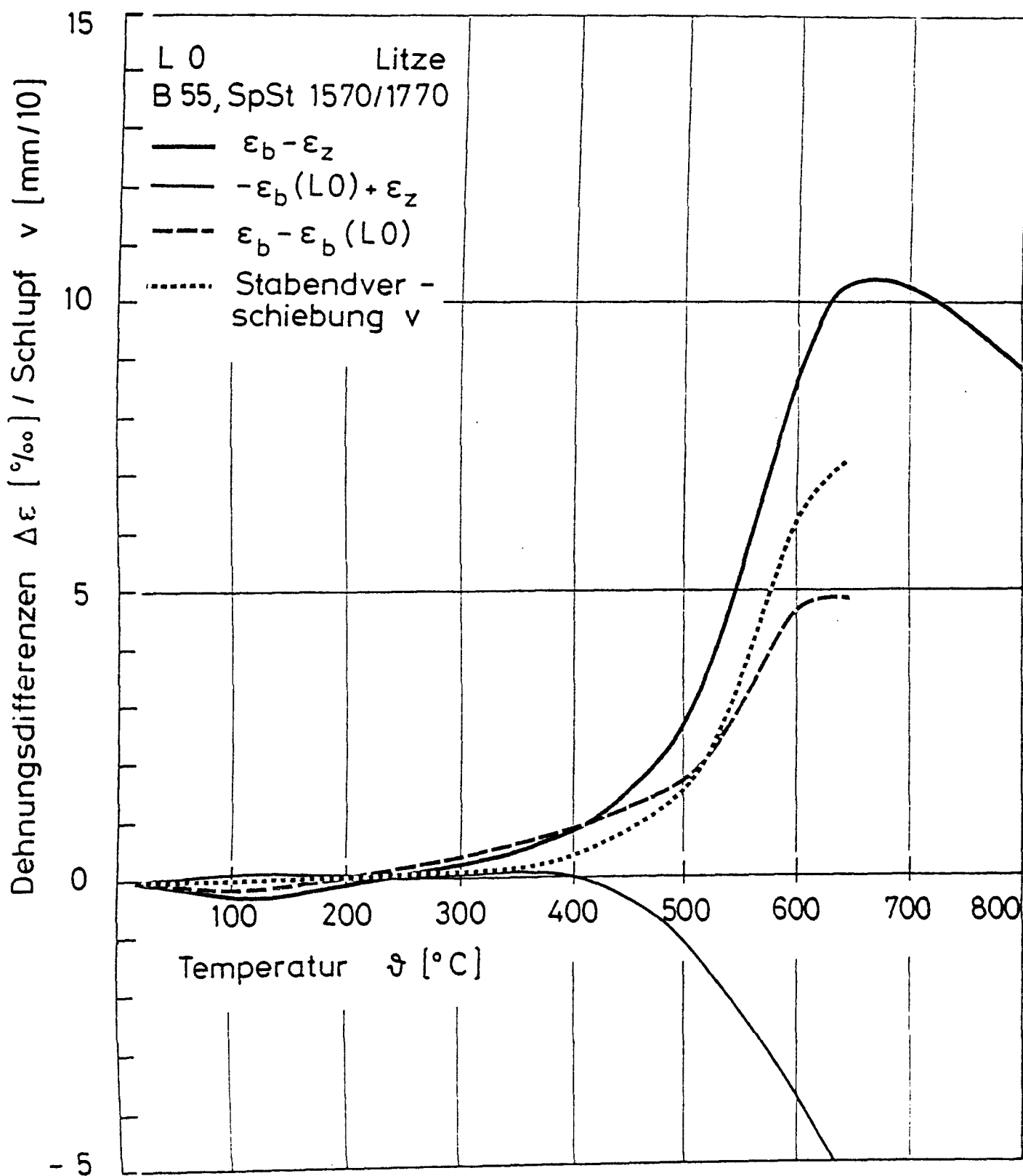


Bild 6.10: Differenzdehnungen Beton-Litze, Beton-Versuchskörper  
 und Versuchskörper-Litze sowie die Stabendverschie-  
 bungen von LO in Abhängigkeit von der Temperatur

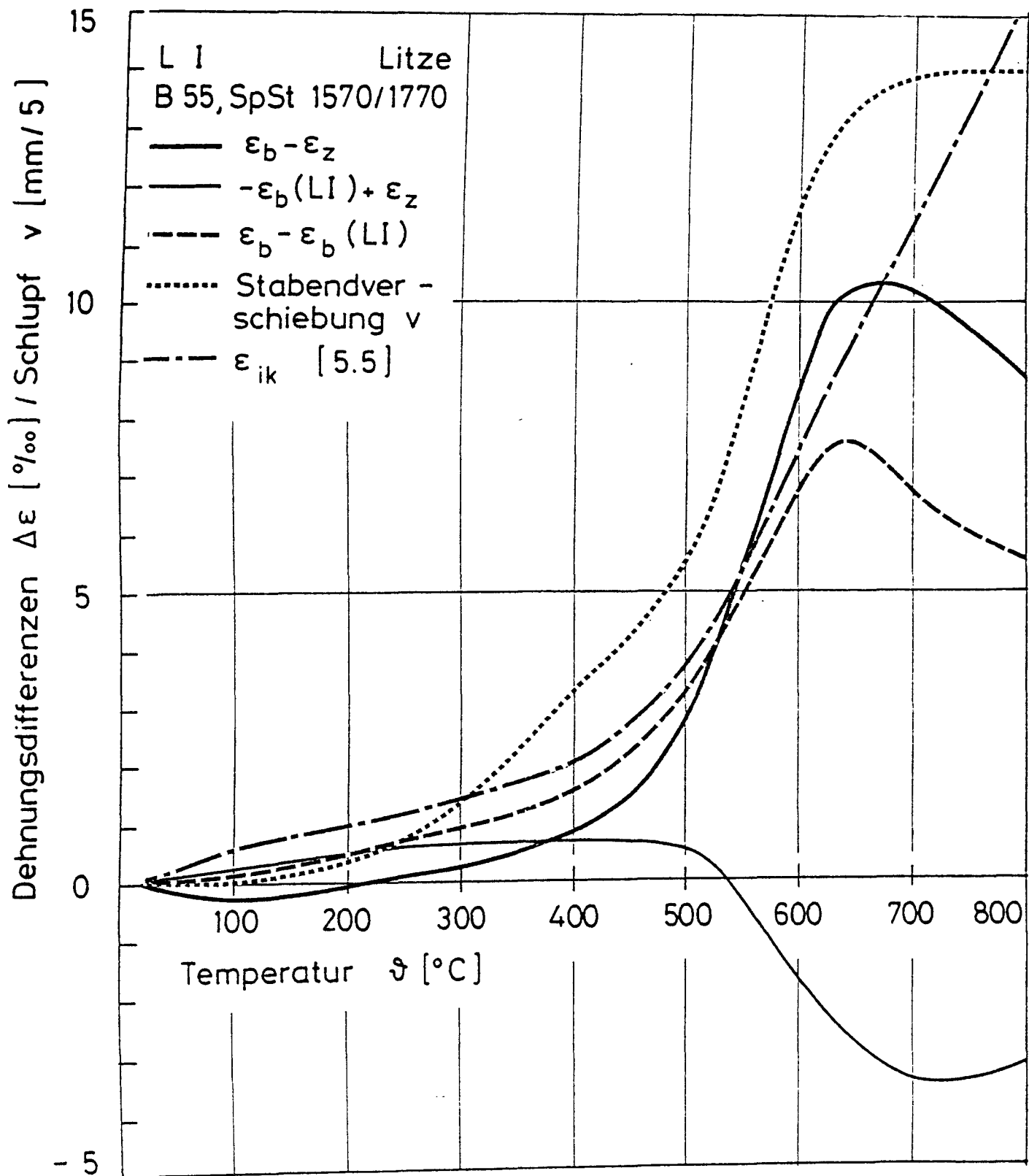


Bild 6.11: Differenzdehnungen Beton-Litze, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Litze sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von LI in Abhängigkeit von der Temperatur

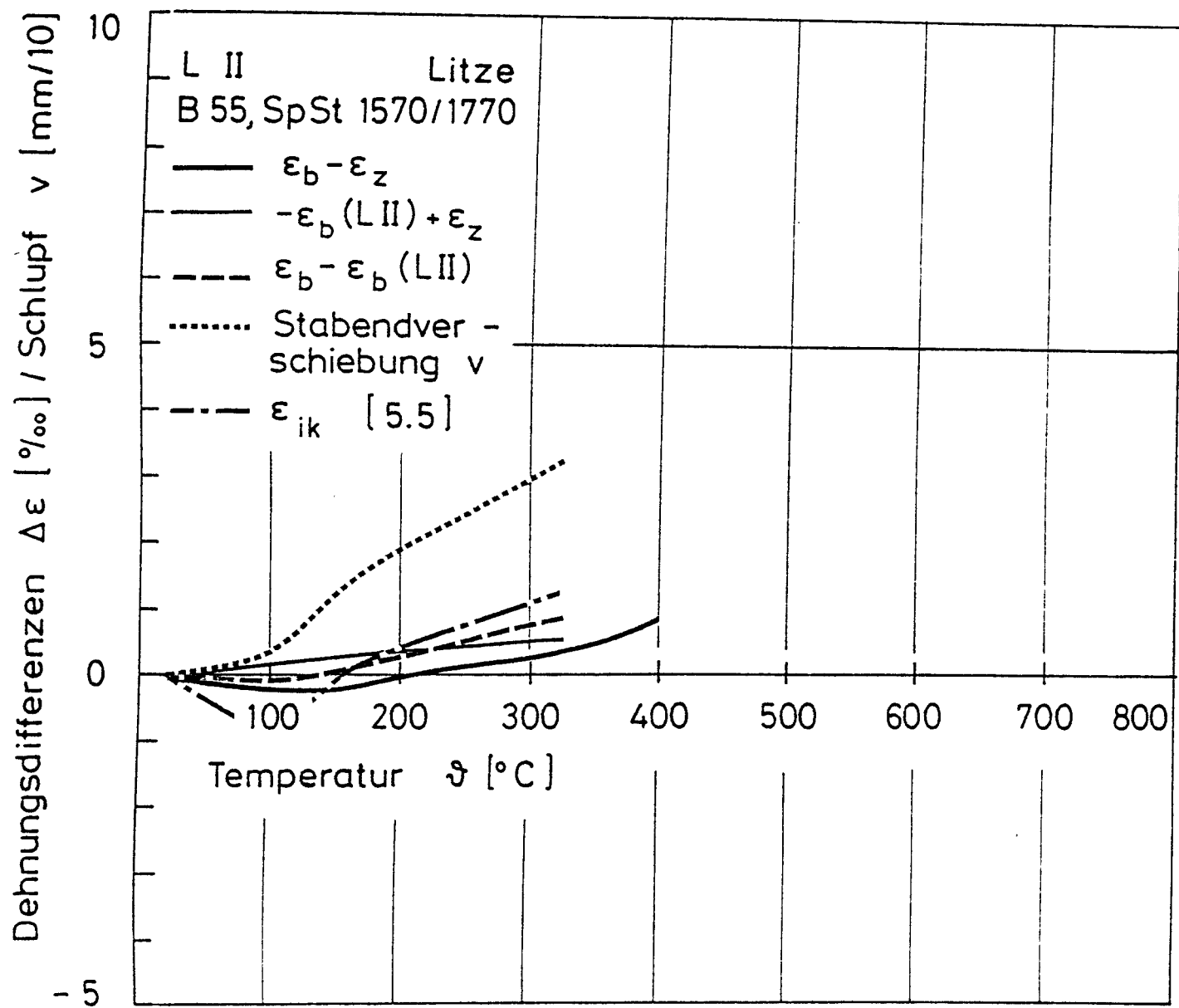
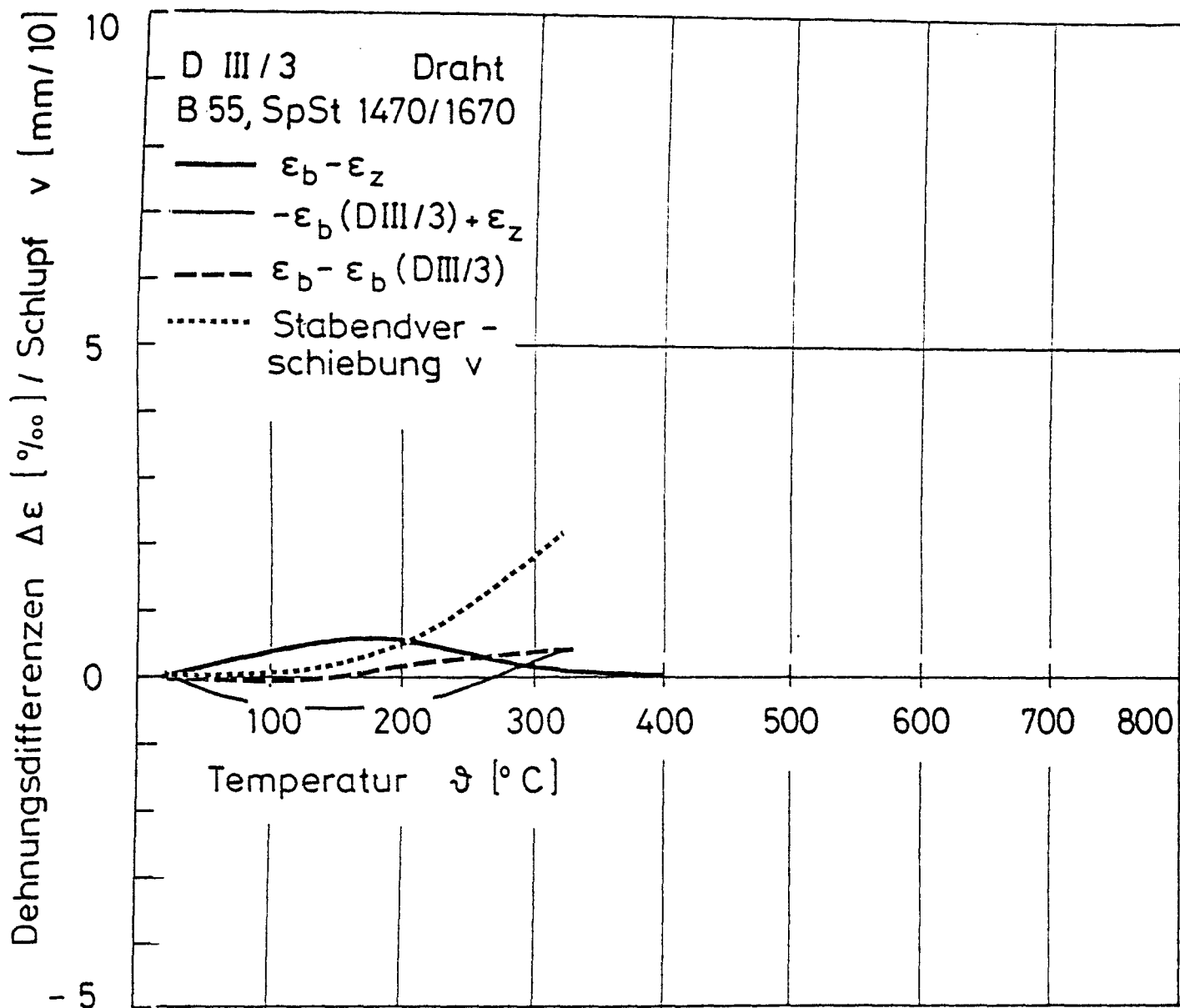


Bild 6.12: Differenzdehnungen Beton-Litze, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Litze sowie die Stabendverschiebungen und die instationären Kriechverformungen von LII in Abhängigkeit von der Temperatur



**Bild 6.13:** Differenzdehnungen Beton-Spanndraht, Beton-Versuchskörper und Versuchskörper-Spanndraht sowie die Stabendverschiebungen von DIII/3 in Abhängigkeit von der Temperatur